

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko – geologická fakulta

Institut environmentálního inženýrství

**VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ POPELA Z BIOMASY
NA TAVITELNOST**

**EFFECT OF BIOMASS ASH CHEMICAL
COMPOSITION ON MELTING**

diplomová práce

Autor:

Bc. Karla Kryštofová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Hana Škrobánková, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Karla Kryštofová

Studijní program:

N2102 Nerostné suroviny

Studijní obor:

3904T005 Environmentální inženýrství

Téma:

Vliv chemického složení popela z biomasy na tavitelnost
Effect of biomass ash chemical composition on melting

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl práce
2. Energetické využití biomasy
3. Chemická charakteristika biomasy
4. Příčiny tvorby inkrustů ve spalovacím zařízení
5. Stanovení tavitelnosti popela
 - 5.1 Popel z travní biomasy
 - 5.2 Popel z kompostů
 - 5.3 Popel z dřevní štěpky
6. Vliv změny chemického složení popela na teplotu tavení
 - 6.1 Alkalické kovy
 - 6.2 Prvky alkalických zemin
 - 6.3 Další chemické prvky – fosfor, chlor
7. Alkalický index
8. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- JEVIČ, Petr a kol. Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých paliv na bázi agrárních bioproduktů. Metodická příručka Mze ČR. Praha: Výzkumný ústav zemědělství techniky, 2008. 132 s. ISBN 978-80-86884-42-4
- JUCHELKOVÁ, Dagmar; RACLAVSKÁ, Helena. (2009): Biomasa multimediální CD-ROM
- KHAN, A. A.; JONG de W.; JANSSENS, P. J.; SPLIETHOFF, H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology. 2009, vol. 90, no. 1, p. 21 – 50.
- KOSTAKIS, George. Mineralogical composition of boiler fouling and slagging deposits and their relation to fly ashes: The case of Kardias power plant. Journal of Hazardous Materials. 2011, vol. 185, no. 2-3, p. 1012-1018.
- KOTLÁNOVÁ, Alice: Stanovení jakostních ukazatelů pelet z biomasy. Biom.cz [online]. 2009-08-26 [cit. 2012-02-13]. ISSN: 1801-2655. Dostupný též z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/stanoveni-jakostnich-ukazatelu-pelet-z-biomasy>>
- MALAŤÁK, Jan; VACULÍK, Petr. Biomasa pro výrobu energie. První. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. 206 s. ISBN 978-80-213-1810-6.
- XIAO, Ruirui; CHEN, Xueli; WANG, Fuchen; YU, Guangsuo. The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature. Renewable Energy. 2011, vol. 36, no. 1, p. 244-249.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Hana Škrobánková, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2013

Datum odevzdání: 30.04.2014



prof. Ing. Vojtech Dimer, CSc.
vedoucí institutu

prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

- Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 30. 4. 2014

.....
Bc. Karla Kryštofová

ANOTACE

Předložená diplomová práce se zabývá hodnocením vlivu chemického složení popela z mulčovací kůry na jeho teplotu tavení. Pro změnu chemického složení popela byly použity alkalické kovy - draslík ve směsi chloridu draselného, kovy alkalických zemin - vápník ve směsi oxidu vápenatého a fosfor ve směsi hydrogenfosforečnanu draselného. Tavitelnost popela byla stanovena, jak bez příměsí, tak i s příměsemi a bylo hodnoceno, zda jsou předpoklady z literatury splněny - že alkalické kovy teplotu tavení snižují, kovy alkalických zemin ji zvyšují a u fosforu záleží, v jaké sloučenině se nachází. Koncentrace pro jednotlivé prvky byly zvoleny 1 %, 10 % a 20 %. Posledním údajem v práci je definice alkalického indexu a jeho významu.

KLÍČOVÁ SLOVA: biomasa, spalování, popel, inkrusty, energie, alkalické kovy, kovy alkalických zemin, fosfor

SUMMARY

This thesis deals with the assessment of the influence of the effect of the mulch ash chemical composition at its melting temperature. To change the chemical composition of the ash to be used, alkali metals (potassium chloride in a mixture of potassium), alkaline earth metals (calcium in the mixture of calcium oxide), and phosphorus (in a mixture of dibasic potassium phosphate). Fusibility of ash was determined as no additives and with additives and has been evaluated, whether the assumptions are met in the literature - that the melting point of the alkali metals are reduced, alkaline earth metals are the melting point increase and phosphorus it depends on what the compound is. Concentrations of individual elements were chosen 1%, 10% and 20%. The last entry in a working definition of alkali index and its significance.

KEYWORDS: biomass, combustion, ash, incrusts, energy, alkali metals, alkaline earth metals, phosphorus

OBSAH

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE.....	1
2. ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOMASY	3
2.1. BIOMASA.....	3
2.2. ROZDĚLENÍ BIOMASY PODLE PŮVODU	5
2.3. ENERGIE	6
2.4. BIOENERGETICKÁ POLITIKA	8
2.5. DOSTUPNOST BIOMASY A NÁKLADOVÉ OTÁZKY	9
3. CHEMICKÁ CHARAKTERISTIKA BIOMASY	11
3.1. KLASIFIKACE BIOMASY	11
3.2. SLOŽENÍ BIOMASY	12
3.3. VLIV NĚKTERÝCH PRVKŮ V PALIVU.....	15
3.4. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI SOUVISEJÍCÍ SE SPALOVÁNÍM.....	16
3.5. VLASTNOSTI PALIV Z BIOMASY	16
3.5.1. <i>Obsah vlhkosti</i>	17
3.5.2. <i>Těkavé látky</i>	19
3.5.3. <i>Výhřevnost</i>	19
3.5.4. <i>Popel</i>	20
4. PŘÍČINY TVORBY INKRUSTŮ VE SPALOVACÍM ZAŘÍZENÍ	22
5. STANOVENÍ TAVITELNOSTI POPELA.....	26
5.1. POPEL Z TRAVNÍ BIOMASY.....	28
5.2. POPEL Z KOMPOSTŮ.....	29
5.3. POPEL Z DŘEVNÍ ŠTĚPKY	30
6. VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ POPELA NA TEPLITU TAVENÍ.....	34
6.1. ALKALICKÉ KOVY	34
6.1.1. <i>Vlastnosti a použití alkalických kovů</i>	34
6.1.2. <i>Vliv alkalických kovů</i>	35
6.2. PRVKY ALKALICKÝCH ZEMIN	39
6.2.1. <i>Vlastnosti a použití kovů alkalických zemin</i>	40
6.2.2. <i>Vliv kovů alkalických zemin</i>	41
6.3. DALŠÍ CHEMICKÉ PRVKY - FOSFOR	43
6.3.1. <i>Vlastnosti a použití fosforu</i>	43
6.3.2. <i>Vliv fosforu</i>	44
7. UKAZATELE TVORBY USAZENIN PŘI SPALOVÁNÍ BIOMASY	47
7.1. ALKALICKÝ INDEX	47
7.2. DALŠÍ UKAZATELE	47
8. VYHODNOCENÍ A ZÁVĚR.....	49
ZDROJE	52
SEZNAM OBRÁZKŮ	62
SEZNAM TABULEK.....	63
SEZNAM GRAFŮ	64

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí své diplomové práce Ing. Haně Škrobánkové, Ph.D. za její odborné vedení, cenné rady a trpělivost při zpracování této práce.

A také děkuji svým rodičům, kteří mi umožnili studium a neúnavně mě v něm podporovali.

SEZNAM ZKRATEK

μm	mikrometr
EJ	exajoule
EU	Evropská unie
g	gram
g/mol	gram na mol
GJ	gigajoule
kg/m^3	kilogram na metr krychlový
kJ/kg	kilojoule na kilogram
kWh	kilowatt hodina
$\text{m}^3/\text{ha}/\text{rok}$	metry krychlové na hektar za rok
MJ/kg	megajoule na kilogram
p.a.	pro analýzu, označení chemikálie pro analytické účely

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

V dnešní době je biomasa považována za jeden z nejperspektivnějších zdrojů energie. Přestože dnešní energetice vládou neobnovitelné zdroje energie, stále více se mluví o využití obnovitelných zdrojů. Jejich využití, především spalování, má proti neobnovitelným zdrojům jako je ropa a zemní plyn, velmi pozitivní vliv na životní prostředí, především co se týká vypouštění emisí do ovzduší.

Mezi nejvýznamnější obnovitelné zdroje v energetice patří právě biomasa, ve které je uložena sluneční energie. Pojem biomasa je obvykle definován jako hmota organického původu, biomasa rostlinná, živočišná, vedlejší organické produkty nebo organické odpady. Pokud se o biomase mluví v souvislosti s energetikou, pak se nejčastěji jedná o dřevo, dřevní odpad, slámu a další zemědělské zbytky, včetně exkrementů užitkově chovaných zvířat. O biomase se hovoří zejména pro její vhodné energetické využití.

Teoreticky lze použít pro výrobu energie všechny druhy biomasy. Pod vyjádřením energetické využití biomasy rozumíme výrobu energie pro ohřev vody či vzduchu, výrobu elektrické energie nebo výrobu jiného druhu energie. Jejím základním prvkem je uhlík a jeho chemické vazby obsahují energii. Ovšem za základní zdroj biomasy jsou považovány rostliny, které pomocí energie ze Slunce, kterou zachycují v chlorofylu, jsou schopny vytvořit sacharidy a následně bílkoviny. V České republice, vzhledem k daným podmínkám, se z hlediska energetiky jedná většinou o dřevo, slámu, energeticky využitelný komunální odpad, tříděný odpad, zemědělské zbytky nebo produkty vznikající při provozu čistíren odpadních vod.

Podle zkušeností, které jsou známy, se dá předpokládat, že největší využití biomasy bude ve spojitosti s decentralizovanými zdroji, zejména s kogeneračními jednotkami nebo s jednotkami trigeneračními, které vyrábí elektřinu, teplo a chlad současně.

Zatím k nejlevnějším způsobům získávání tepelné energie patří spalování dřeva a dřevěného paliva. Ostatní energetické využití biomasy není kvůli vyšší ekonomické náročnosti zatím v podmínkách České republiky tolik rozšířené [4, 102].

Předložená diplomová práce obsahuje rešeršní část, kde se věnuji energetickému využití biomasy, jejímu chemickému složení a charakteristickým chemickým rysům a také

se věnuji příčině tvorby inkrustů. Dále je v práci praktická část, kde se zabývám studiem spalování biomasy, vlivem změny chemického složení biomasy na průběh spalování a teploty jednotlivých fází tavení. Jako příklady chemických sloučenin jsem zvolila alkalické kovy, kovy alkalických zemin a fosfor. A v posledním bodě se věnuji významu alkalického indexu pro hodnocení biomasy.

Cíle diplomové práce se dají shrnout do několika bodů:

- Rešeršně zpracovat problematiku energetického využití biomasy a její chemické charakteristiky.
- Prozkoumat příčiny tvorby inkrustů ve spalovacích zařízeních.
- Určení tavitelnosti popela z biomasy – úprava vzorků.
- Určení vlivu změny chemického složení popela z biomasy na její teplotu tavení, pro všechny zvolené sloučeniny.
- Popsat podstatu alkalického indexu a jeho vlivu na tavení biomasy.
- Vyhodnotit výsledky.

2. ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOMASY

Výrobě energie po celém světě již celá desetiletí dominují fosilní paliva (přibližně 80% z celkové spotřeby více než 400 EJ ročně). Biomasa dnes přispívá asi 10 až 15 % (45 ± 10 EJ) z tohoto požadavku. V průmyslových zemích je dodávka energie z biomasy zhruba 9 až 14% z celkové spotřeby energie, ale v rozvojových zemích je to asi jedna pětina až jedna třetina. V celé řadě těchto zemí biomasa pokrývá i více než 50 až 90 % z celkové spotřeby energie, avšak velká část tohoto využití biomasy je nekomerční a slouží k vaření a vytápění chudší části obyvatel. Využití biomasy v rámci Evropské unie se v posledních desetiletích výrazně zvýšilo, a ambice EU pro využití biomasy jsou vysoké. Během posledních deseti let, jsou pozorovány podstatné údaje o růstu bioenergie v EU, a to zejména pro energie jako jsou elektřina a růst spotřeby biopaliv v dopravním sektoru. Výroba tepla se v letech 1990 až 2000 zvýšila přibližně o 2 % ročně, bioelektrické energie vzrostly o cca 9% ročně a produkce biopaliv vzrostla o 8 %, ve stejném období [1, 2, 3].

2.1. Biomasa

Přesná formulace pojmu biomasa je poněkud složitá. Obvykle je biomasa definována jako organická hmota živého původu, avšak zahrnuje i odumřelé části jak rostlin, tak i živočichů. Pokud se týká vymezení biomasy v rámci energetického využití, pak biomasou chápeme především rostlinnou produkci, dřevo, dřevní odpad nebo cíleně pěstované energetické rostliny [8].

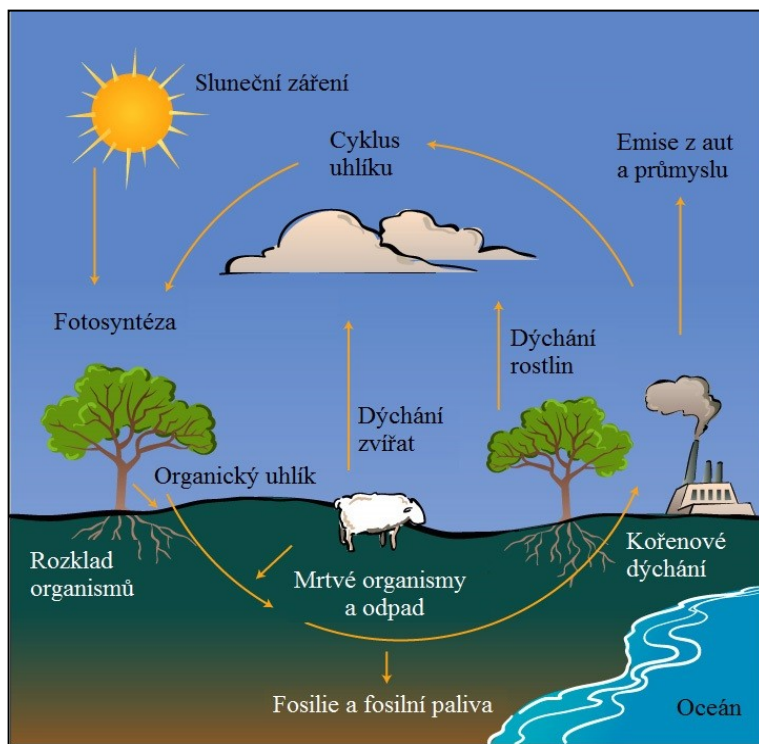
Každá rostlina může být budoucím zdrojem pro výrobu energie z biomasy. V dnešní době můžeme za energetické plodiny považovat i většinu zemědělsky pěstovaných rostlin. Dokonce dáváme pěstování energetických rostlin přednost před uspokojením potravinové poptávky. Stále se zvyšuje počet lidí, kteří vidí pěstování biomasy jako pouhý zdroj obnovitelné energie. Podle státní definice jsou „OZE nefosilní zdroje energie, jimiž jsou větrná energie, sluneční energie, energie okolního prostředí, zejména geotermální energie vody a energie biomasy“ [4, 5].

V současné době často vznikají bioplynové stanice, ve kterých se používá biomasa k výrobě energie, z 1 tuny trávy lze získat až 320 kWh elektrické energie, z 1 tuny močůvky až 60 kWh a z 1 tuny biologických odpadů až 340 kWh. Důležitým faktorem

v produkci biomasy je fakt, že ze všech obnovitelných zdrojů energie pouze biomasa produkuje kyslík, což z ní dělá potenciální víceúčelový zdroj [6, 9].

Všeobecně známý je rovněž pozitivní vliv produkce biomasy na globální ekosystém. Život na planetě by nebyl možný bez chemické reakce, při které hraje hlavní roli uhlík. Ten prochází celým ekosystémem, jelikož je vázán z atmosféry pomocí fotosyntézy, jako oxid uhličitý (CO_2) a stává se součástí rostlinných tkání. Organismy, které fotosyntéza posiluje, jsou zdrojem energie pro živočichy a mikroorganismy, které jsou následně potravou pro člověka. Rostlinná biomasa se tak stává důležitou „zásobárnou“ uhlíku a energie nejen při svém růstu, ale i po těžbě. Celý cyklus uhlíku, který vidíme na obrázku (Obrázek 1), se může uzavřít energetickým využitím biomasy, kdy při jejím spálení dojde k jeho uvolnění zpět do atmosféry a může být opět pomocí fotosyntézy navázán do rostlinné tkáně, nebo může být vdechnut člověkem nebo živočichy [15, 22].

Veškerá biomasa je závislá na fotosyntéze, která je základním procesem zabezpečujícím život na Zemi. V atmosféře je obsaženo asi 0,03 % oxidu uhličitého (CO_2). Množství kyslíku (O_2) vzniklého při fotosyntéze je velmi vysoké, vzhledem k tomu, že z každých šesti molekul CO_2 vznikne šest molekul O_2 . Tímto procesem se fotosyntéza stává jediným přírodním dějem, při kterém se kyslík uvolňuje [8,18].



Obrázek 1: Koloběh uhlíku, zdroj: [106]

2.2. Rozdělení biomasy podle původu

Biomasu můžeme podle původu rozdělit na dva druhy:

- Cíleně pěstovaná
- Odpadní

Cíleně pěstovaná biomasa je pořád častějším úkazem při zakládání lesů, tvořených převážně rychle rostoucími dřevinami. Ty jsou u nás zakládány především pro účely vyprodukovat co největší množství biomasy pro energetické účely, na co nejmenší ploše. Svůj nezastupitelný význam zde má jednoduchost výsadby, pěstování a sklizně. Takto zakládaným lesům se říká plantáže, výsadba je zde organizována do rovných řad s pravidelnými vzdálenostmi [5].

Tímto plantážovým způsobem jsou dřeviny pro energetické využití pěstovány po celém světě, v Austrálii, Brazílii, Chile, Zimbabwe, atd. Nejčastěji se v těchto oblastech pěstuje blahovičník (*Eukalyptus*) s možným výnosem až 40 m³/ha/rok s předpokládanou dobou obměny 15 let. V Číně, Indii, Vietnamu a Thajsku se pěstují tropické akáty (*Robinia*) s výnosem 15-30 m³/ha/rok s dobou obměny 7-10 let. Subtropická borovice (*Pinus patula*) dosahuje výnosu 15-18 m³/ha/rok s dobou obměny 15-18 let [12].

Využití vypěstované biomasy není pouze spalování, ale používá se i pro ohřev vody, vzduchu a výrobu paliva. Zpracovaná dřevní hmota může být využita také v různých formách pro výrobu kompostů, pro výrobu nábytku, izolační stavební desky nebo ve farmaceutickém průmyslu. Produkce je však především zaměřena na následné energetické využití, jako obnovitelný zdroj energie. Forma sklizně, výroby i skladování závisí na následném využití [14].

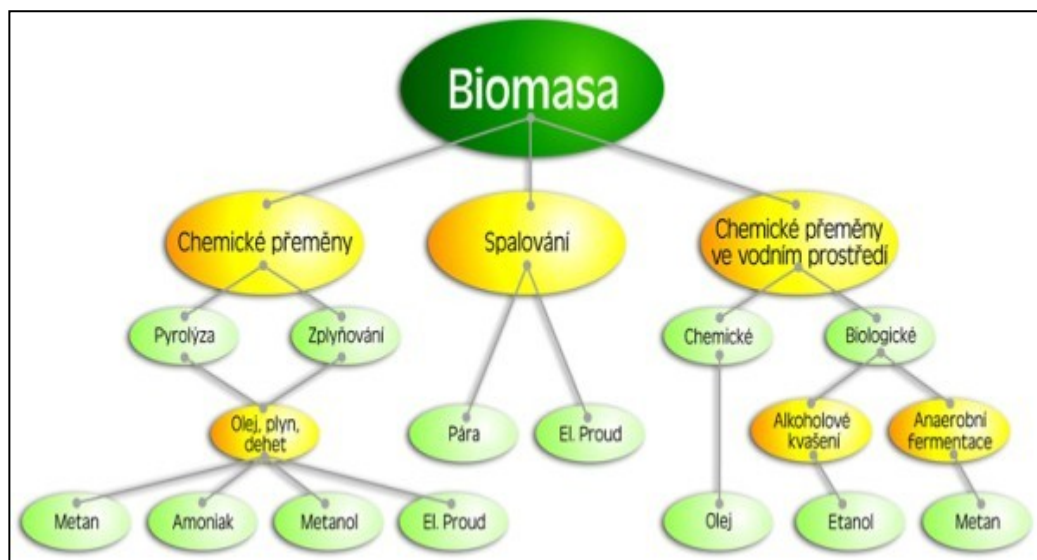
Odpadní biomasu tvoří vedlejší produkty z rostlinné a živočišné výroby, dřezozpracujícího, papírenského a potravinářského průmyslu, biologicky rozložitelný odpad, lesní odpad, sláma, lihovarnické výpalky a zbytky z dalších výrobních odvětví. Takto získaný bioodpad stačí pouze upravit na použitelné palivo (v případě slámy a některého odpadu z lesnictví obvykle není potřeba) jako pelety nebo brikety. Zbytky z živočišné produkce – exkrementy hospodářsky chovaných zvířat, jsou používány při fermentaci organické hmoty v bioplynových stanicích. To umožňuje zachování

hnojících účinků exkrementů, jejich využití jako hnojivo, ovšem s vyšším obsahem draslíku a fosforu [59].

2.3. Energie

Různé metody získávání energie z biomasy jsou uvedeny na následujícím obrázku (Obrázek 2):

- termochemická konverze:
 - spalování,
 - zplyňování,
 - pyrolýza (suché procesy),
- biochemická konverze:
 - anaerobní fermentace,
 - aerobní fermentace,
 - alkoholová fermentace (mokrý procesy),
- fyzikálně-chemická konverze:
 - esterifikací bio-olejů [10].



Obrázek 2: Energetické využití biomasy, zdroj: [107]

Při **spalování** biomasy není nutná předběžná úprava paliv. Je nutno věnovat velkou pozornost podmínkám, jak při spalování, tak i při následném čištění spalin, jelikož má biomasa proměnlivé složení, především vlhkost. V současnosti je spalování prováděno dvěma způsoby:

- spalování na roštu,
- spalování ve fluidní peci [7].

Zplyňování je přeměna biomasy při vysokých teplotách. Organická hmota je přeměněná na hořlavé plyny, které se dále upravují a následně energeticky využívají.

Podstatou **pyrolýzy** je ohřev materiálu, což vede k jeho štěpení a k vzniku stálých nízkomolekulárních produktů a tuhých zbytků [60].

Anaerobní fermentace je přeměna surové organické hmoty na biologicky stabilizovaný substrát a bioplyn. Přeměna probíhá za nepřístupu vzduchu v hermeticky uzavřených nádobách, které se nazývají fermentory. Kyslík je pro anaerobní bakterie způsobující rozklad jedovatý. Anaerobní digesce má čtyři fáze:

- hydrolýza – mikroorganismy štěpí makromolekulární organické látky na menší molekuly,
- acidogeneze – produkty hydrolýzy jsou štěpeny na jednodušší látky, jako jsou kyseliny, alkoholy, oxid uhličitý (CO_2), vodík (H_2),
- acetogeneze – tvorba kyseliny octové (CH_3COOH), CO_2 a H_2 ,
- metanogeneze – vznik metanu (CH_4), vedlejším produktem je CO_2 [61].

Aerobní fermentace je biologický rozkladný proces za přístupu vzduchu, pomocí bakterií, hub a dalších rozkladačů. Důležité je udržení správné vlhkosti. Dělí se na tři fáze:

- fáze rozkladu,
- fáze přeměny,
- fáze dozrávání.

Alkoholová fermentace přeměňuje rostlinné polysacharidy na alkohol, pomocí kvasinek. Kvasinky obsahují enzymy, které přeměňují rostlinné sacharidy na etanol a oxid uhličitý za vzniku tepla a energie. Tato fermentace probíhá za anaerobních podmínek [13].

Esterifikace bio olejů neboli transesterifikace je mísení metanolu s hydroxidem sodným a s olejem ze sojových bobů nebo z řepky olejné. Výstupem této reakce je methylester, kterému se říká bionafta [62].

Zavádění biomasy do energetiky má řadu výhod, stručně je lze charakterizovat takto:

- přispívání k primárním energetickým zdrojům,
- využívání vedlejších a odpadních materiálů, usnadnění recyklace hmoty a energie,
- pěstování energetických rostlin, na plochách zdevastovaných například důlní činností, může částečně nahradit (eliminovat náklady) rekultivaci,
- ozelenění devastované krajiny energeticky pěstovanými rostlinami umožní stabilizaci regionů,
- navýšení energie z obnovitelných zdrojů, přispěje k omezení dovozu fosilních paliv ze zahraničí.

Energetické využití biomasy má řadu nesporných výhod, avšak začlenění fytoenergetiky do plného provozu si vyžádá ještě mnoho úsilí v mnoha oborech lidské činnosti. Realizace je ale nezbytná pro udržení energetické stability na naší planetě [14].

2.4. Bioenergetická politika

Vlády různých zemí se zavazují k nakládání s energiemi s co nejmenším dopadem na životní prostředí. Každá země v Evropě řeší kromě své politiky v oblasti energetiky a klimatu i politiku bioenergie. Evropská unie si stanovila cíl pro bioenergii pro rok 2010, dosáhnout 10% dodávek celkové energie z biomasy. V několika konkrétních zemích zejména ve Skandinávii jsou nastaveny vysoké cíle pro budoucnost energie z biomasy. Švédsko uvedlo, že kolem roku 2020 by mělo až 40 % jeho dodávek primární energie pocházet z biomasy [11, 15, 16].

Dalším příkladem je nedávná Evropská směrnice o biopalivech pro odvětví dopravy, která stanovila cíle pro využívání biomasy pro výrobu pohonných hmot. Různé globální scénáře energetické studie uvádí, že v tomto „století biomasy“ můžeme přispět mnohem více: až 80 % energie z biomasy v roce 2100 [5, 17].

Předpokládaný potenciál primární biomasy je v roce 2050 až 1135 EJ za rok, v závislosti na růstu populace a poptávky po potravinách, produktivita energetických plodin na různých typech pozemků, apod. Tento rozsah může být zúžen na 300 až 675 EJ nebo 40-60 % z poptávky energie v roce 2050, které by mohly být vyráběny na 4-10 % zemského povrchu [5, 11, 14].

Tyto cíle v souladu s různými globálními scénáři pro využití bioenergie, nasvědčují tomu, že biomasa může přispět více než 400 EJ (nebo 25 % až téměř 100 % z aktuální světové spotřeby energie) do světového zásobování energií v průběhu tohoto století [11, 19, 20].

2.5. Dostupnost biomasy a nákladové otázky

Realizace výše uvedených procentuálních cílů nebude jednoduchá. Dostupnost paliva nebo jeho alternativy, různé ceny, zdroje příjmů, to vše patří k již předpokládaným problémům. Jako jediné opatření ke splnění budoucích potřeb obnovitelných zdrojů paliva se jeví produkce biomasy – tzv. „energetické plodiny“ nebo „energetické zemědělství“.

Obecně zatím platí, že produkce některých druhů biomasy je na jednotku vyrobené energie dražší než použití stávajících surovin. Typická cena se pro trvalé dřeviny v rámci západoevropských podmínek pohybuje v rozmezí 3-6 euro (€) za GJ, ve srovnání s dováženým uhlím, kde je cena okolo 1-2 euro (€) za GJ. Náklady na výrobu biomasy jsou závislé především na nákladech na půdy, práci a na průměrném hektarovém výnosu. Řešením může být použití plodiny částečně k energetickému použití a částečně k materiálovému využití, protože materiál z plodin může přinášet další příjmy a snížení emisí skleníkových plynů [11,21].

Nicméně některé studie naznačují, že rozsáhlé pěstování energetických plodin, včetně mezikontinentálního obchodu s biopalivy nebo se dřevem, by mohlo být ekonomicky proveditelné a nevedlo by k dramatickým ztrátám energie [4, 22].

Biopaliva zůstávají o něco dražší než fosilní pohonné hmoty. Biomasa ovšem nabízí celou řadu výhod ve srovnání s fosilními palivy. Je považována za obnovitelný zdroj energie s minimem emisí CO₂, pokud je vyráběna udržitelným způsobem. Vyhodnocení bilancí CO₂ ukazuje, že ve srovnání se spalováním černého uhlí, mohou být emise CO₂ sníženy až o 93 %. Dalšími výhodami jsou nízká produkce oxidů síry (SO_x) a i nízké emise oxidu dusíku (NO_x). V popelu z biomasy se zachycuje část SO₂ vznikající při spalování. Kromě toho, obsah dusíku v palivu z biomasy, je v mnoha případech mnohem nižší než v uhlí, a může být převeden na amoniak v průběhu fáze pyrolýzy při spalování, a proto může být použit jako palivo při spoluspalování. Z tohoto důvodu může mít spoluspalování za následek také nižší produkci NO_x [23, 24].

Kromě toho je pěstování energetických plodin – biomasy, také generátor zaměstnanosti, zejména ve venkovských oblastech. Biomasa také může být „domácí“ zdroj energie pro většinu zemí, čímž se sníží dovoz uhlí. Nicméně na rozdíl od logistických otázek jsou zde některé velké technické problémy spojené s využitím termochemické biomasy. Patří mezi ně mimo jiné problémy s NO_x, N₂O a tuhými znečišťujícími látkami, problémy s depozicí a korozí a otázky související s popelem [23].

3. CHEMICKÁ CHARAKTERISTIKA BIOMASY

Obecně o složení biomasy můžeme říct, že se skládá z organické části, která je bohatá na kyslíkaté, sirné a dusíkaté sloučeniny a z části anorganické, která je obsažena uvnitř organické struktury. Biomasa však může být kontaminována přidruženými (cizími) materiály, geologickými procesy, znečištěním během sklizně, dopravy nebo skladování.

Lze říci, že z hlediska zastoupení prvků je biomasa dřevního charakteru považována za palivo nízkoalkalické, s nižší koncentrací chloru a vyšší koncentrací síry, naopak rostlinná biomasa je považována za palivo vysokoalkalické, s vyšším obsahem chloru a nižším obsahem síry. V případě, že je biomasa využívána k energetickým účelům spalování, hrají chlor a síra zásadní roli v otázce nežádoucí koroze pece [27].

3.1. Klasifikace biomasy

Biomasa je biologický materiál odvozený z živých, nebo nedávno živých organismů. V souvislosti biomasy s energií je často používán výraz: rostlinný materiál, právě tak, jako materiál na bázi živočišného i rostlinného původu [14].

Biomasa jako zdroj energie je velmi různorodá, a proto existuje velká potřeba komplexního klasifikačního systému. Důvodem pro vytvoření takového systému je schopnost předpovědět „chování“ biomasy, identifikace, ke které třídě patří. Jeden přístup mohl být založen na základě základních složek, a to celulosy, hemicelulosy a ligninu, procenta a jejich chování. Nicméně, takový systém nemohl odpovídat při případné interakci mezi komponenty a byl považován za nespolehlivý. Byly tedy navrženy dva klasifikační přístupy založené na původu biomasy a jejích vlastnostech [28, 29].

Paliva z biomasy lze obecně rozdělit do čtyř základních skupin:

1. Primární zbytky: Vedlejší produkty potravinářských plodin a lesních výrobků (dřevo, sláma, obilí, kukuřice apod.).
2. Sekundární zbytky: Vedlejší produkty zpracování biomasy pro výrobu potravin nebo biomasa z materiálového použití (pily a papírny, potravinářský a nápojový průmysl, semena atd.).
3. Terciární zbytky: Vedlejší produkty použité biomasy odvozených komodit (odpad a dřevo z demolice apod.).
4. Energetické plodiny [30].

Klasifikace založená na vlastnostech, lze rozdělit:

- Dřevo a dřevěné palivo (tvrdé a měkké dřevo, dřevo z demolic).
- Bylinné palivo (sláma, trávy, stopky).
- Odpady (čistírenské kaly, odpady odvozené z paliva) [28].
- Deriváty (odpad z papíru a potravinářského průmyslu).
- Vodní řasy, apod.
- Energetické plodiny (speciálně pěstované rostliny pro energetické účely).

Vzhledem k různorodé povaze paliva z biomasy, se mohou vlastnosti v těchto kategoriích velmi lišit. Na rozdíl od energetických plodin, se může obsah vlhkosti snadno měnit [28].

Další, novější klasifikace, kterou lze použít, je evropská norma pro tuhá biopaliva CEN TC 335. Tato klasifikace je založena na původu biopaliv a jejich zdroji:

1. dřevní biomasa (dřevní štěpka, pelety, piliny atd.),
2. bylinná biomasa,
3. ovocná biomasa,
4. směs.

CEN TC 335 je rozdělena do 5 podskupin, WG1 terminologie, definice a popis, WG2 specifikace paliva a tříd, WG3 odběr vzorků, WG4 fyzikální a mechanické zkoušky, a WG5 chemické zkušební metody [14].

3.2. Složení biomasy

Mezi složky biomasy patří celulósa, hemicelulósy, lignin, oleje, pryskyřice, jednoduché cukry, škroby, voda, uhlovodíky a další sloučeniny. Koncentrace každé sloučeniny se liší v závislosti na druhu a typu rostlinné tkáně, fázi růstu a růstových podmínkách [29]. Technické použití některých složek biomasy je uvedeno v tabulce (Tabulka 1).

Celulósa je lineární polysacharid β - d glukopyranózových jednotek spojených s 1 až 4 - glykosidickými vazbami (velký počet navzájem spojených molekul glukózy). Je to nejvýznamnější část biomasy, která je přítomna ve všech druzích, jelikož jde o základní sloučeninu rostlinných buněk. Je velmi hygroskopická, ovšem v suchém stavu

je stálá. Chemicky se dá rozložit na jednoduché cukry. Někteří živočichové umí tento rozklad využít a „používají“ celulosu jako potravu. Výhřevnost suché celulosy je asi 18 MJ/kg.

Hemicelulosa jsou polysacharidy s proměnlivým složením. Velmi snadno se dají rozložit na monosacharidy, ze kterých se dá pomocí kvašení získat etanol.

Lignin je nepravidelný polymer fenypropan, který je tvořen převážně z aromatických alkoholů. Tvoří významnou část dřeva, jeho funkcí je zpevnění buněčných stěn, tvoří zhruba třetinu hmotnosti. Není tak hygroskopický jako celulosa a má vyšší výhřevnost. Při pyrolýze z něj prchají různé sloučeniny, například syringol, který je údajně zodpovědný za vůni uzeného masa nebo guajakol, který podporuje jeho chuť [63].

Oleje jsou sloučeniny mastných kyselin a glycerinu (trojsytný alkohol). Často je nacházíme v semenech, jelikož jsou považovány, za akumulátor energie. Oleje mají velkou výhřevnost – 37 MJ/kg (skoro 90% výhřevnosti motorové nafty).

Pryskyřice je tvořena převážně směsí uhlovodíků, které mají výrazně vyšší výhřevnost než celulosa nebo lignin. Jelikož je pryskyřice obsažena ve dřevě jehličnatých stromů, ty tedy mají vyšší výhřevnost než stromy listnaté.

Škrob je polysacharid, tvořený ze stejných jednotek jako celulosa, na rozdíl od ní je ale snadno štěpitelný na jednoduché cukry, které lze kvašením přeměnit na etanol [63].

Vzhledem ke struktuře sacharidů, je biomasa s ohledem na tradiční fosilní paliva, včetně kapalných uhlovodíků a uhlí vysoce okysličená [31].

Tabulka 1: Možnosti technického využití biomasy, zdroj: [63]

Složka biomasy	Transformovaný produkt	Výrobky a použití
Cukry	Kyselina citronová	Prací prášky, farmaceutika
	Cukerné tenzidy	Prací prostředky, kosmetika
	Cukerné polymery	Polyestery, polyuretany, tkaniny v medicíně
Škroby	Přírodní škrob	Papír a lepenka, kosmetika, plnivo do plastů
	Plastifikovaný škrob	Výroba polystyrolových chipsů
	Škrobové biopolymery	Kyselina polyhydroxymáselná (výroba bioplastů)
Oleje	Přímé použití	Barvy, laky, svíčky, mýdla
	Glycerin	Plasty, farmaceutika, kosmetika, výbušniny
	Matné kyseliny	Kovová mýdla, kosmetika, plasty, dezinfekce
	Kyselina eruková	Změkčovač, laky, aditiva, proti-pěnové přísady
Rostlinná vlákna	Dlouhá vlákna (len, konopí)	Textilie pro svrchní pracovní oděvy, lana, brzdová a spojková obložení
	Krátká vlákna	Izolační hmoty, filtrační textilie, textilní tapety
Lignocelulosa	Celulosa	Papír, textilní vlákna, výbušniny, lepidla
	Lignin	Vanilin, UV adsorbéry, kosmetika
	Hemicelulosa	Bělící prostředky, odvápnovací prostředky

Převážné složení biomasy z hlediska uhlíku (C), vodíku (H) a kyslíku (O) se příliš neliší mezi jednotlivými zdroji biomasy. Typické suché hmotnostní procenta jsou

pro C 30 - 60 %, pro H 5 - 6 % a pro O 30 - 45%, resp. C, H, O podíly mohou být různé pro typická paliva. Dusík (N), síru (S) a chlór (Cl) můžeme také nalézt v množství obvykle méně než 1 % sušiny, ale občas i nad touto hodnotou. Dusík je důležitý stopový prvek pro rostliny, a je rozhodující pro jejich růst. Některé anorganické prvky, se nachází ve vysokých koncentracích. Vzhledem k uhlí, má biomasa obecně méně uhlíku (C), kyslíku (O), hliníku (Al), železa (Fe), titanu (Ti) a síry (S), více oxidu křemičitého (SiO_2), chloru (Cl), draslíku (K) a někdy i více vápníku (Ca). Některé druhy biomasy také obsahují kontaminující prvky a sloučeniny ve stopovém množství, v závislosti na zdroji paliva. Například toxické kovy jako kadmium a olovo se běžně vyskytují v dřevnatých palivech, především ve dřevě z demolice [9, 32].

3.3. Vliv některých prvků v palivu

Některé prvky v biomase si zaslouží zvláštní pozornost. Mezi ně patří, chlor (Cl), draslík (K), síra (S), dusík (N) a křemík (Si). Možná, že nejdůležitějším prvkem, pokud jde o jeho chování v různých situacích související se spalováním, je chlor, který se nachází ve velkém množství v určitých typech biomasy, jako je sláma. Může mít vliv na funkci spalovacích zařízení a může být zodpovědný za vznik koroze. Vysoká hodnota chloru a alkalických kovů v některých palivech z biomasy, může způsobit vážné škody na spalovacích jednotkách. Největší pozornost je věnována vysokoteplotní korozi trubkových hadů vyvolaných chlorem na povrchu. Chlor usnadňuje mobilitu mnoha anorganických sloučenin, zejména draslíku. Bylinná paliva obsahují křemík a draslík ve vysokých procentech. Vysoké procento křemíku spolu s draslíkem a chlorem také hrají svou roli a mohou působit vážné problémy depozice popela za vysokých nebo středních teplot spalování [29, 26].

Primární zdroje těchto problémů jsou:

1. Reakce alkálie s oxidem křemičitým za vzniku alkalických křemičitanů, které tají nebo měknou při nízkých teplotách, může být nižší než 700 °C, v závislosti na složení.
2. Reakce s alkálií síry za vzniku alkalických síranů na spalovacích teplosměnných plochách. Alkalické sloučeniny hrají ústřední roli v obou procesech [33].

Draslík je dominantní alkalický zdroj ve většině biomasy. Vysoký obsah S v uhlí vede ke zvýšení emisí SO_x. Biomasa má obvykle nízký obsah síry, ale síra z uhlí při společném spalování může způsobit problémy, v závislosti na složení biomasy. Na druhé straně, S obsažená v uhlí, může být do jisté míry vhodná prevence lepidla usazeniny, KCl může být přeměněna na síran draselný K₂SO₄, který je o něco méně škodlivý. Vysoké obsahy těchto prvků (Cl, K, S), také představují vážné obavy o nakupení problémů v oblasti fluidních kotlů. Síra a chlor jsou spolu s dusíkem také zodpovědní za plynné emise včetně SO_x, NO_x a HCl a do jisté míry dioxiny a furany [26, 33, 34, 35].

3.4. Fyzikální vlastnosti související se spalováním

Fyzikální vlastnosti biomasy se velmi liší. Vlastnosti jako je hustota, pórovitost, drobivost a vnitřní plochy jsou různé u různých druhů biomasy. Objemová hmotnost, velikost, tvar a rozdělení částic se týkají metod přípravy paliva. V závislosti na procesu spalování pomocí vybrané technologie, jsou zapotřebí různé předúpravné kroky, jako je dimenzování, drcení, štěpkování a sušení, dále skladování, zpracování (zhutňování) před přepravou, zjištění obsahu vlhkosti, obsahu popela, velikosti částic, a někdy dokonce i stupeň kontaminace. Velikost částic, tvar a měrná hmotnost jsou důležité vlastnosti před spalováním. Většina biopaliv, zejména ze zemědělského původu (sláma, rýžové slupky) mají nízké objemové hustoty. Například objemové hustoty nasekané slámy a rýžové plevy -50 až 120 a 100 až 125 kg/m³, jsou ve srovnání s černým uhlím velmi nízké. U černého uhlí se hodnoty pohybují v rozmezí od 560 do 600 kg/m³, u hnědého uhlí pak 800 až 900 kg/m³. Nízká objemová hustota biomasy má řadu nevýhod, relativně nízká výhřevnost na jednotku objemu, obtíže při procesním řízení, potřeba obrovských uložišť, drahá doprava, omezení používaných technologií jako strhávání paliva ve fluidních pecích. Tento problém se dá vyřešit pomocí zahušťování, což je dobře známý způsob překonání těchto nevýhod. Jednoduše řečeno, zahušťování odstraní dutiny inter a intra – částic. Tři nejčastější používané techniky zahušťování jsou lisování, briketování a peletování, s tímto pořadím také roste složitost zařízení na výrobu, energetické nároky a náklady [36, 37, 38].

3.5. Vlastnosti paliv z biomasy

Vlastnosti paliva často tvoří základ pro zvolené spalovací technologie. V závislosti na těchto vlastnostech může být palivo z biomasy vyloučeno z konkrétního

druhu spalování částečně pro technické parametry a částečně z důvodů ochrany životního prostředí. Vlastnosti biomasy jsou ovlivněny nejen původem biomasy, ale i průběhem celého systému při výrobě. Nejdůležitější vlastnosti paliva jsou dány prvotní a konečnou analýzou, výhřevností a množstvím popela v palivu. Prvotní analýza poskytuje informace o obsahu pevného uhlíku a těkavých látkách, konečná analýza pak poskytuje přesná procenta obsahu C, S, H, N, Cl a O. Hodnoty se pohybují v širokých mezích. Ve srovnání s uhlím má biomasa obvykle méně uhlíku, kyslíku, hliníku a železa a má nižší výhřevnost, obsahuje více draslíku a má vyšší obsah vlhkosti [36, 39, 40].

Další důležité chemické a tepelné vlastnosti jsou měrné teplo, tepelná vodivost, obsah těkavých látek a emisivita [41].

3.5.1. Obsah vlhkosti

V každém tuhém palivu je obsažena voda. Voda je stejně jako popel (popeloviny) nehořlavou složkou paliva, která je v palivu nežádoucí, jelikož snižuje jeho tepelnou hodnotu. Obsah vlhkosti biomasy se může měnit v širokém rozmezí 0 - 60 %, avšak u rašeliny to může být až 90 %. Obecně platí, že čím je palivo mladší, tím obsahuje více vody, jelikož obsah vlhkosti se řídí stářím paliva [52].

Suchá neboli bezvodá biomasa se v přírodě nevyskytuje. Čerstvé dřevo obsahuje i 55 % vlhkosti a i po dvou letech ještě asi 20 %. Houby, které se podílejí na samovznícení, také ovlivňují obsah vody v biomase. U čerstvě pokácených stromů může být obsah vody až 60 %, jeho výhřevnost tudíž nestačí ani na udržení spalovacího procesu. Ovšem, jak by se mohlo zdát, příliš suché dřevo také není pro spalování optimální, jelikož hoří explozivně a velká část energie uniká v kouřových plynech. Za optimální je považována vlhkost okolo 30% [53].

Formy vody v biomase:

- Chemicky vázaná voda je součástí chemických sloučenin. Nelze ji z biomasy odstranit sušením, pouze spálením, je v biomase zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti. Její celkové množství obvykle představuje asi 1-2 % sušiny, její přítomnost lze zjistit pouze při chemických analýzách. Při fyzikální a mechanické charakteristice je její význam zanedbatelný.

- Vázaná voda (hygroskopická) se nachází v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxilové skupiny -OH amorfni části celulosy a hemicelulos. Vázaná voda se v palivu vyskytuje při vlhkostech 0-30 %. Největší význam má při fyzikální a mechanické charakteristice [42, 56].
- Volná voda (kapilární) vyplňuje mezibuněčné prostory. Její význam při mechanické a fyzikální charakteristice je malý [56, 88].

Obsah vlhkosti se s časem a vlivem okolí mění (teplota, tlak, vzdušná vlhkost, atd.). Vlhkost čerstvě pokáceného dřeva, je především z energetického hlediska příliš vysoká. Čas, který je zapotřebí ke snížení relativní vlhkosti pod 40 % se pohybuje okolo 3 měsíců, ale v závislosti na roční době a počasí se může tato doba měnit. Nejeefektivnějším způsobem vysychání je ponechat stromy po pokácení vcelku až do úplného opadu listů nebo jehličí, teprve potom se štěpkují. Tato úprava se nazývá transpirační vysychání. Strom může v tomto případě pomoci zanechaného asimilačního aparátu vody vytranspirovat [42].

Pro stanovení vlhkosti se v praxi používají dva způsoby:

- Vlhkost vztažená k absolutní sušině je absolutní vlhkost a vypočítá se pomocí následujícího vztahu:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 (\%)$$

- Vlhkost vztažená k výchozí hmotnosti dřeva, relativní vlhkost, se vypočítá pomocí rovnice:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 (\%)$$

kde m_1 je hmotnost vzorku před vysušením, m_2 je hmotnost vzorku po vysušení, w je vlhkost dřeva [53].

U biopaliv, která mají velmi vysoký obsah vlhkosti, se mohou vyskytovat určité problémy, problémy se zapálením a snížení teploty spalování, což má vliv na kvalitu spalování. Kromě toho vede vysoký obsah vlhkosti k nadměrnému použití paliva, což generuje velké množství kouřových plynů. Přítomnost vody v biomase ovlivňuje její chování v průběhu pyrolýzy a má vliv na fyzikální vlastnosti a kvalitu pyrolýzních plynů [57, 58].

3.5.2. Těkavé látky

Biomasa má obecně velmi vysoký obsah těkavých látek. Těkavé látky se dále dělí na plyny, jako jsou lehké uhlovodíky, oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO₂), vodík (H₂), vlhkost, a dehty. Výtěžky energie jsou závislé na teplotě a rychlosti ohřevu. Vzhledem k vysokému obsahu těkavých látek jdou biopaliva snadněji zapálit i při nízkých teplotách. Předpokládá se spalování biomasy vysokým tempem, proto musí být odpovídajícím způsobem kontrolováno. Během pyrolýzní fáze spalování se zvyšuje poměr vodíku k uhlíku a v menší míře i poměr kyslíku k uhlíku. Ve srovnání s uhlím může biomasa ztratit až 90 % své hmotnosti již v první fázi spalování. Typické ztráty převážně těkavých látek jsou asi 75 % [29, 91].

3.5.3. Výhřevnost

Při hoření se z paliva uvolňuje teplo, které je vztažené na jeho hmotnost, tento vztah se vyjadřuje jako kJ (nebo MJ) / kg. Tomuto uvolněnému teplu se obvykle říká spalné, nebo ho označujeme jako výhřevnost paliva, obvykle v jednotkách kg/m³. Je to množství tepla z paliva, kdy vlhkost paliva zůstane ve spalinách spolu s energií potřebnou na přeměnu vlhkosti ve vodní páru. Spalné teplo je tedy vyšší o energii, která se spotřebovala na ohřev vody nebo přeměnu na vodní páru. Tato tepelná ztráta je asi 2500 kJ na 1 kg vody v palivu. Výhřevnost v dnešní době nejpoužívanější biomasy (vidíme v tabulce 2) je srovnatelná s výhřevností hnědého uhlí [64, 90].

Tabulka 2: Výhřevnost různých druhů biomasy, zdroj: [63]

Druh paliva	Obsah vody (%)	Výhřevnost (MJ/kg)	Druh paliva	Obsah vody (%)	Výhřevnost (MJ/kg)
Listnaté dřevo (obecně)	15	14,6	Jehličnaté dřevo (obecně)	15	15,6
Akát	20	16,3	Borovice	20	18,4
Bříza	20	15,0	Jedle	20	15,9
Buk	20	15,5	Modřín	20	15,0
Dub	20	15,9	Smrk	20	15,3
Habr	20	16,7	Dřevní štěpka	30	12,2
Jasan	20	15,7	Sláma z obilovin	10	15,5
Olše	20	16,7	Sláma z kukuřice	10	14,4
Topol	20	12,9	Sláma z řepky	10	16,0
Vrba	20	16,9	Mulčovací kůra	10	21,7

3.5.4. Popel

Popel je anorganická nehořlavá část paliva, která zůstane po spalování a obsahuje podstatnou část minerální frakce z původní biomasy. Anorganický materiál biomasy lze rozdělit na dvě části, z nichž jedna je obsažena v palivu, a druhá je přidána do paliva prostřednictvím zpracovatelských kroků. Tyto nečistoty často tvoří hlavní část obsahu popela dřevěných paliv. Jeho složení je obvykle odlišné od přirozených materiálů, například krystalické silikáty a oxid hlinitý ze začleněných písků, jílu a dalších půdních částic, a draslík ze živců. Mezi hlavní prvky obsažené v biomase dále patří Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, S a P [36, 39].

Obsah popela se mezi jednotlivými druhy biopaliv liší. Může být v rozmezí od 1 % dřevo a dřevo z demolice až do 30-40 % dřevní zbytky. S vysokým obsahem popela v palivu se zvyšuje potřeba účinného systému na odstraňování prachu a čištění emisí. Vysoký obsah popela také může snížit výhřevnost paliva [33].

Materiál, který je ze své podstaty nestabilní, může při spalování uvolňovat některé deriváty z alkalických kovů a kovů alkalických zemin, zejména draslíku a sodíku. K uvolnění ostatních netěkavých složek jako jsou Ca a Mg, může dojít při rychlé pyrolýze. Obsah vysoce alkalických složek jako jsou K a Si obvykle způsobují nízkou teplotu tání popela, naopak obsah Mg a Ca teplotu tání popela zvyšuje [36, 41].

Teploty tání, měknutí a spékání se mohou mezi různými druhy biopaliv výrazně lišit. Tato charakteristika je zásadní při určování teploty spalování, aby se zabránilo vzniku

strusky. Potenciál následného využití popela je ovlivněn mírou jeho znečištění a tím, do jaké míry je popel slitý nebo roztavený. V případě čisté biomasy obsahuje popel hodně minerálů a důležitých stopových prvků, proto může být recyklován, například v lesním areálu. Některá paliva z biomasy jako je dřevo z demolic nebo dřevní kůra, obsahují také toxické kovy, včetně As, Cd, Cr, Cu, Pb a Hg. Informace o obsahu a množství těchto látek má zásadní význam pro využití popelových zbytků, jako i pro monitorování životního prostředí [25, 43].

4. PŘÍČINY TVORBY INKRUSTŮ VE SPALOVACÍM ZAŘÍZENÍ

Spalování biomasy s sebou přináší kromě výhod i řadu problémů, které se musí minimalizovat nebo úplně odstranit. Kromě emisí vzniklých při spalování je nutné předejít vzniku inkrustů a usazenin, které by mohly poškodit činnost spalovaného zařízení. Zároveň je potřeba nejvhodnějším způsobem využít popele a popílku za spalování biomasy [44, 96].

Při termických procesech dochází k fyzikálním změnám popela na žárovém lůžku, je tedy nutné znát teplotu tání. Je to teplota, při které se roztaví všechny složky popela. Avšak tání probíhá v širokém teplotním rozpětí, ve kterém dochází k postupné přeměně popela. Podle dosažené teploty dochází k deformaci popela až po jeho úplné roztavení, což může vést k poruchám funkcí spalovacího zařízení například zalití mezer v roštu struskou. U rostlin, které mají nízké teploty tání popela (stébelniny, celé rostliny obilovin) často dochází k překročení hraniční teploty a to vede ke vzniku inkrustů [45, 92].

Tvorbu inkrustů a nánosů na roštích ovlivňují svou přítomností alkalické kovy a prvky alkalických zemin. Do skupiny alkalických kovů patří lithium (Li), sodík (Na), draslík (K), rubidium (Rb), cesium (Cs), francium (Fr). Jako prvky alkalických zemin, pak označujeme vápník (Ca), stroncium (Sr), baryum (Ba) a radium (Ra). Tyto prvky na rozdíl od alkalických kovů, které teplotu tání popela snižují, ji zvyšují. Biomasa na rozdíl od fosilních paliv nemá alkálie a prvky alkalických zemin vázané na minerální fáze, ale vázané organicky nebo v iontových formách. Podle způsobu navázání se pak odvíjí jejich uvolňování při spalování, jsou méně stálé (těkavější) a snadno se uvolňují v iontové a organické formě. Následně může docházet až k tvorbě inkrustů na teplostěnných plochách, případně k produkci usazenin a k reakcím částic s materiálem spalovacího roštu. Podle studie Nutlapati [45] se anorganická část paliva dá rozdělit na reaktivní a nereaktivní frakci. Nereaktivní část se skládá z křemíku, hliníku a železa, reaktivní frakce pak z alkálií sodíku a draslíku, z chloru, síry, vápníku a hořčíku. Očekává se, že nereaktivní část projde spalováním beze změny, kdežto část reaktivní dosáhne rovnováhy [45, 94, 95].

S ohledem na chování, při spalování, je důležitým prvkem chlor. Vysoký obsah chloru a alkálií hlavně draslíku ve spalované biomase, může mít za následek vysokoteplotní korozi nebo nánosy, způsobující provozní problémy zařízení. Vysokoteplotní korozi má za následek emise chloru v podobě kyseliny chlorovodíkové

(HCl), v původním palivu se chlor vyskytuje ve formě chloridu, nejvyšší obsah má sláma [46, 96].

Více než koncentrace alkálií v biomase, ovlivňuje jejich vypařování během spalování přítomnost chloru. I jeho malá koncentrace může vést k tvorbě chloridů a sloučenin alkalických kovů na teplosměnných plochách spalovacího zařízení [47].

Nejen okolní atmosféra ve spalovacím zařízení, její teplota a obsah chloru, ale také složení popela velmi ovlivňuje jeho teplotu tání. Tuto teplotu snižují: oxid železitý (Fe_2O_3), oxid železnatý (FeO), oxid titaničitý (TiO_2), oxid hořečnatý (MgO), oxid sodný (Na_2O) a oxid draselný (K_2O). Naopak teplotu tání zvyšují oxid křemičitý (SiO_2), oxid vápenatý (CaO) a oxid hlinitý (Al_2O_3). Obecně vzato mají na teplotu tání největší vliv sloučeniny železa. Nejvyšší jsou teploty tání popela v silně oxidační atmosféře, která je složena ze vzduchu, kyslíku, oxidu uhličitého, vodní páry a oxidů železa. Teploty tání v silně redukčním prostředí, jsou o něco nižší, ale stále vysoké, to se skládá z oxidu uhelnatého a vodíku. Nejnížší teploty jsou v prostředí smíšeném, směs vodní páry a vodíku [48, 94].

Z energetického hlediska hraje nejdůležitější roli z alkalických kovů draslík. Jeho vysoké koncentrace v některých druzích biomasy mohou mít klíčový význam při tvorbě inkrustů a nánosů v kotli. Draslík, jako zdroj živin pro rostliny, je přes kořenový systém absorbován do dřevního materiálu ve všech částech rostliny, nebo dřeviny. V důsledku stárnutí dřeva, změnou jeho struktury a postupným vysoušením, mohou některé draselné ionty vytvářet anorganické sloučeniny, uhličitany, sírany, hydroxidy nebo chloridy [49].

Vzniklé sloučeniny se při spalování snadno uvolňují do plynného skupenství. V závislosti na koncentraci chloru v biomase se při jejím spalování uvolňuje draslík ve formě hydroxidu draselného (KOH) nebo chloridu draselného (KCl). Specifické množství draslíku může ve své plynné formě reagovat s velice malými částicemi popela a tím dochází k jeho oddělení při fázi usazování [50, 97].

Při spalování travní biomasy je draslík uvolňován ve sloučeninách tetrakřemičitan draselný ($\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$), chlorid draselný (KCl) a hydroxid draselný (KOH). Z dřevní biomasy je pak draslík uvolňován jako chlorid draselný (KCl), síran draselný (K_2SO_4) a hydroxid draselný (KOH). Chlorid draselný může reagovat při teplotě nižší než $700\text{ }^\circ\text{C}$, s uhlíkem nebo sírou, za vzniku uhličitanů nebo síranů, které se na povrchu kotle snadno usazují. Lze

předpokládat, že přítomnost chloru pomůže sírany odpařit, potom působí chlor pro draslík jako transportní médium [51, 93].

Pokud je při spalování draslíku přítomen chlor, síra a oxid křemičitý (K_2O_3) může docházet k celé řadě nevhodných reakcí, vznik alkalických silikátů reakcí s oxidem křemičitým, které mají nízkou teplotu tání, dále vznik alkalických chloridů a síranů, reakcí alkálie s chlorem nebo sírou, ty se často usazují na stěnách kotle. Poměr K:Cl má v palivu, při teplotách vyšších než 1300 °C, vliv na vznik alkalických silikátů. Pokud je tento poměr > 1 je draslík ve formě alkalických silikátů, pokud je naopak tento poměr < 1 , je draslík, na úkor KOH a draselných silikátů zastoupen, ve formě KCl [45, 95].

Nejen na složení biopaliva záleží intenzita tvorby inkrustů a usazenin, ale také na teplotě a provozních podmínkách spalovacího zařízení. Jak už bylo zmíněno výše, teplota tání je taková, při které dochází k roztavení všech jeho složek. Plamen hoření má obvykle vyšší teplotu, než je teplota tání popela. Tání probíhá v široké teplotní škále. U většiny druhů stébelnin a trav je teplota tání vysoká, více než 1000 – 1200 °C. Většina druhů biomasy však nemá jeden ostrý bod tání. Začíná měknout, ale k úplnému roztavení dochází mnohdy až při teplotě o několik stovek stupňů vyšší [47, 93].

Podle dostupných informací by neměla teplota ve spalovacím prostoru dosáhnout u slámy, sena a celých obilovin více než 850 – 900 °C a u dřevin 1150 °C. Překročení těchto teplot způsobuje znečištění teplosměnných ploch. Popel bohatý na draslík se již při 850 °C spéká a velmi pevně přilne k vyzdívce nebo k roštu. Proto by mělo být od sebe odděleno zplyňování paliva, které probíhá okolo 600 °C a dohořívání spalín při 1100 °C [52].

V palivech rostlinného původu je koncentrace alkalických kovů a prvků alkalických zemin velice proměnlivá. Díky koncentraci těchto látek v biomase můžeme říci, že rostlinná biomasa je považována za palivo vysoce alkalické s vyšším obsahem síry a nižším obsahem chloru, dřevní biomasa pak za palivo nízkoalkalické s vyšším obsahem chloru a nižším obsahem síry. Tato charakteristika je nutná při výběru spalovacího zařízení a také pro kontrolu spalovací teploty [53, 96].

Norma ČSN ISO 540 (Uhlí a koks - Stanovení tavitelnosti popela) poskytuje informace o tání a chování při tavení anorganických složek popela při vysokých teplotách. Standardizovaná metoda je založena na metodě Segerova kužele.

Dále je dle této normy změna skupenství popela charakterizována čtyřmi teplotami:

- Teplota deformace – DT (deformation temperature): první příznaky zaoblení hrotu pozorovaného jehlanu.
- Teplota měknutí – ST (sphere temperature): teplota, při které je výška a šířka základny pozorovaného jehlanu stejná.
- Teplota tání – HT (hemisphere temperature): pozorované těleso vytváří tvar přibližně polokoule, výška se rovná polovině průměru základny.
- Teplota tečení – FT (flow temperature): popel se rozteče na podložce ve vrstvě, jejíž výška je třetina výšky pozorovaného tělesa při teplotě polokulovitého tvaru [89].

K odhadu pravděpodobnosti tvorby inkrustů a usazenin ve spalovacím zařízení existují indexy spékavosti. Ty jsou vytvořeny na základě prvkového složení popela z biomasy a jeho chování při spalování. Tyto indexy spékavosti popele mají nedostatky, ale prozatím je to jediná cesta k určení spékavosti a tvorby inkrustů. Avšak jejich využití v praxi je reálné pouze při spoluspalování biomasy a uhlí [54, 55].

Pro spalování i pro snadnou údržbu spalovacího zařízení je důležitá velikost zrn popela, z hlediska tvorby inkrustů, nánosů, úniků toxických kovů, vysokoteplotní koroze a úniku prachových částic. Malé částice do 50 μm , mají tendenci usadit se na stěnách pece, kde vzniká možnost tvorby inkrustů, zatímco velké částice mohou ovlivnit teplosměnné plochy v peci [55, 92].

5. STANOVENÍ TAVITELNOSTI POPELA

Tavitelnost a tání popela patří mezi důležité charakteristiky popela. Tyto charakteristiky se určují pomocí analýzy, při zvyšující se teplotě. Teploty tavení popela jsou rozhodující parametry, které určují, jak se palivo bude chovat v reálných podmínkách průmyslu, a zda a za jakých teplot bude vytvářet nežádoucí nápeky na teplosměnných plochách [70].

Proces tání popela má velmi široký interval teplot i více než 200 °C. Tento interval se charakterizuje třemi teplotami: teplotou měknutí, teplotou tání a teplotou tečení. Podle těchto teplot je možné odhadnout, jakých teplot může být dosaženo ve spalovacím zařízení, aby nevznikly provozní problémy nebo poruchy tohoto zařízení, vznik inkrustů a usazenin na teplosměnných plochách.

- Teplota měknutí - T_A (°C) je dolní mez intervalu tavitelnosti popela.
- Teplota tání - T_B (°C) je závislá na chemickém složení popela a na atmosféře v peci. Nachází se kdekoli v intervalu tavitelnosti popela.
- Teplota tečení - T_C (°C) je horní mez intervalu tavitelnosti popela.

Pro stanovení tavitelnosti popela se v České republice používají různé metody (normy):

- ČSN 44 1359 – norma pro zkoušení tuhých paliv, byla zavedena normou RVHP s označením ST SEV 3430-81, ta však byla v roce 2000 nahrazena mezinárodním standardem ISO 540, který se stal českou normou ČSN ISO 540.
- Evropská komise pro normalizaci (CEN) řeší charakteristiku určování charakteristických teplot tavitelnosti popela biomasy v dokumentu CEN/TS 15370-1 z roku 2006. Od roku 2007 má tento dokument statut předběžné české státní normy pod označením ŠN P CEN/TS 15370-1.
- Na Ústavu pro výzkum a využití paliv a.s. v Praze vznikla další metodika, kterou zpracoval Kubant – je založena na vizuálním pozorování tvarových změn zkušebního tělíska (od ostatních norem se ale liší jeho definice). Postupy se mění od předchozích dvou [70].

Všechny metody pro stanovení charakteristickým teplot tání popela mají stejný základní princip, avšak v několika parametrech se liší – způsob přípravy zkušebního tělíska a příprava vzorku popela. V tabulce (Tabulka 3) jsou shrnuty nejdůležitější informace

o způsobu získání popela, jeho úpravě, použité atmosféře a o přípravě zkušebního tělíska [70].

Tabulka 3: Rozdíly při přípravě vzorku, zdroj: [70]

Zdroj	Získávání popela	Úprava popela	Příprava zkušebního tělíska	Atmosféra
ČSN ISO 540	Vzorek pod 0,0212 mm se ohřívá na 500 °C během 1 h – izoterma 30-60 min, následuje ohřev na 815 °C a izoterma min. 1 h	Drcení pod 0,075 mm	Formička, lis ani potupo není popsán; jehlan výšky 19 mm; krychlička o straně 3-7 mm; váleček o výšce=průměr=3-9 mm; komolý kužel výšky 4 mm; pomocné látky: dextrin, voda, vazelína, sušení na vzduchu, odstranění organické hmoty ohřevem na 815 °C	Redukční, oxidační i poloredukční
Kubant	Částečně dle ČSN ISO 1171, vzorek pod 1mm se ohřívá při rychlosti ohřevu 5°C/min do 250°C, izoterma 1 h, následuje ohřev 550 °C, po celou dobu přívod vzduchu a odvod prchavé hořlaviny přirozeným tahem. Izoterma 2 h při 550 °C a nuceně se přivádí vzduch, popřípadě se zvyšuje podíl O ₂ .	Sítování 0,2 mm, zbytek rozemlít, aby sítem prošel	Definována formička, lis i postup: vtláčecí tlak lisu 0,15 N/mm ² , váleček o výšce=průměr=3 mm; pomocné kapaliny: voda, sušení při 80 °C a následně při 160 °C (při velkém podílu K a S až při 410 °C)	Poloredukční, oxidační
ČSN P CEN/TS 15370-1	Dle ČSN ISO 1171, vzorek pod 1mm (pokud je nutné 0,25mm) se vysuší (určení vlhkosti) a dále ohřívá při rychlosti ohřevu 5°C/min do 250°C, izoterma 1h, následuje ohřev na 550°C během hodiny a izoterma 2h. při pochybách rozdělit na menší vzorky a žíhat dalších 30min nebo použít vodu nebo dusičnan amonný a opětovně ohřát na 550°C.	Drcení na rozměr pod 0,075 mm	Formička ani lis nepopsán; vtláčení tlak lisu 1,5N/mm ² , váleček o výšce=průměr=3-5mm; pomocné látky: dextrin, voda, etanol; blíže nespecifikované sušení	Redukční, oxidační

Tavení popela je výsledkem více jevů na sobě závislých. Tání popela se obvykle vyjadřuje pomocí křivky tání, která se sestavuje s osami - obsah popela a teplota. Z těchto křivek se obvykle odečítají dvě klíčové teploty, pro charakterizaci popela:

- teplota T_{15} při které se roztaví 15% popelovin. Při této teplotě se povrch jednotlivých částic stává lepkavým a může ulpívat na částech spalovacího zařízení nebo se na ně nalepí další částice,
- teplota T_{70} při této teplotě je roztaveno již 70% popelovin. Při této teplotě začínají nánosy ve vertikálním směru stékat [68, 69].

5.1. Popel z travní biomasy

Spalování travní biomasy je prováděno především ve formě pelet z travin. Velmi významným činitelem pro úpravu travin je druh zvolené trávy, jelikož každý druh obsahuje jinou koncentraci obsažených alkálií. V tabulce (Tabulka 4) je možno vidět charakteristické teploty tavení popela u různých druhů trav [66].

Tabulka 4: Teploty tavení popela z travin, zdroj: [67]

Druh traviny	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)
Sveřep horský TACIT	964	1096	1226	1288
Hybrid PERUN	969	1107	1329	1342
Hybrid BEČVA	978	1075	1285	1458
Ovsík vyvýšený rožnovský	879	1238	1305	1339
Hybrid LOFA	932	1150	1276	1287
Jetel LOTR	983	1487	1489	1494
Kostřava rákosovitá KORA	899	1172	1186	1204
Psineček velký rožnovský	879	1141	1196	1316
Lesknice rákosovitá Chrastava	901	1156	1240	1285

Klíčovým faktorem pro spalování je bod tání popela. Travní biomasa se před úpravou na pelety a následným spalováním většinou upravuje vyloužením, čímž se snižuje koncentrace obsažených alkálií. Po vyloužení se bod tavení zvyšuje z hodnot okolo 1070 °C na 1400 °C. V tabulce (Tabulka 5) můžeme vidět změnu teploty tavení popele z travin v závislosti na délce loužení travin [66].

Tabulka 5: Doba loužení travin (minuty) a změna teplot tání °C, zdroj: [67]

Druh traviny	Doba loužení (min)					
	0	10	30	60	120	240
	FT (°C)					
Sveřep horský TACIT	1220	1240	1298	1328	1400	1415
Hybrid PERUN	1091	1111	1123	1146	1181	1252
Hybrid BEČVA	1229	1282	1307	1332	1345	1357
Ovsík vyvýšený rožnovský	1319	1328	1335	1338	1344	1350
Hybrid LOFA	1242	1250	1270	1295	1318	1356
Jetel LOTR	1068	1088	1090	1092	1161	1180
Kostřava rákosovitá KORA	1325	1335	1354	1355	1361	1370
Psineček velký rožnovský	1246	1260	1278	1303	1304	1380
Lesknice rákosovitá Chrastava	1312	1347	1393	1401	1417	1420

Bod tavení je ovlivněn množstvím popela v biomase. Travniny s nízkým obsahem popela okolo 3-4 % mají hodnotu bodu tavení pod teplotou 1200 °C, kdežto travní biomasa s vyšším obsahem kolem 5-10 % popela vykazuje zvýšenou teplotu tavení nad teplotou 1500 °C [66].

Tato koncentrace je ovlivněna řadou faktorů, půdním typem, délkou vegetačního období, způsobem pěstování, jestli je hnojená půda, či nikoli, způsobem sklizně a obdobím v roce. Vliv délky vegetačního období se projevil jako velmi významný na hodnotu koncentrace popela, která klesá s prodlužující se délkou vegetačního období. Z energetického hlediska využití travin je obsah popela klíčový, jelikož jejich spékavost může být klíčovým faktorem pro využití pelet z trav. Bylo prokázáno, že u hnojených trav je koncentrace popela nižší, v průměru o 1,4 % [66].

5.2. Popel z kompostů

Spalování kompostů se provádí podle vyhlášky 453/2008 Sb. o stanovení druhů, způsobu využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy, ve znění pozdějších předpisů. V této vyhlášce je jako biopalivo uveden kompost nevyhovující jakosti nebo určený k energetickým účelům a jiné biopalivo z něj vyrobené v podobě

energetického kompostu. Teplota tání popela, která byla pozorována u technologických kompostů se měnila od teploty 1190 °C až po teplotu 1431 °C. Komposty mají nejčastěji teplotu měknutí blízko teplotě 1180 °C, což je charakteristická teplota měknutí smrkového dřeva. V následující tabulce (Tabulka 6) můžeme vidět charakteristické teploty tavení popela kompostů z trav [67].

Tabulka 6: Teplota tání popela z kompostů, zdroj: [67]

Druhy kompostovaných travin	DT °C	ST °C	HT °C	FT °C
Sveřep horský TACIT	1125	1155	1170	1200
Hybrid PERUN	960	1080	1120	1230
Hybrid BEČVA	1105	1160	1175	1210
Ovsík vyvýšený rožnovský	1060	1185	1210	1280
Hybrid LOFA	1040	1070	1190	1260
Jetel LOTR	970	985	995	1025
Kostřava rákosovitá KORA	935	1230	1300	1325
Psineček velký rožnovský	915	1170	1265	1295
Lesknice rákosovitá Chrastava	1000	1200	1295	1315

5.3. Popel z dřevní štěpky

Pro stanovení popela z dřevní štěpky jsem jako náhradu použila popel z mulčovací kůry. Toto stanovení probíhalo v laboratoři Institutu environmentálního inženýrství. Pro toto stanovení jsem použila normu ČSN ISO 540 a pec s digitálním zobrazením CARBOLITE (výrobce CAF, Německo).

Z popela z mulčovací kůry jsem pomocí pojiva, připraveného z vody a dextrózy v poměru 5g/100ml, připravila hmotu. Připravené pojiva vidíme na obrázku (Obrázek 3). Připravenou formu, kterou můžeme vidět na obrázku níže (Obrázek 4), jsem nahřála na elektrickém vařiči na teplotu přibližně 60 °C a nastříkala ji silikonem, který napomáhá následnému vysunutí jehlánků z formy. Okraje formy jsem lehce otřela papírovou utěrkou, kvůli odstranění přebytku silikonu.



Obrázek 3: Připravené pojivo



Obrázek 4: Forma na jehlánky

Směs popele a pojiva jsem pomocí špachtle natlačila do formy tak, aby byly okraje připravovaného tělíska ostře zarovnané. Po chvilce tuhnutí tělísek jsem je pomocí železného párátko vyklopila na podložku formy. Následně jsem je pomocí pojiva (alumina adhesive, výrobce LECO, Německo) přilepila na keramickou destičku a hotové vzorky umístila na stojánek. Tento stojánek jsem následně zasunula do pece, pec s digitálním zobrazováním CARBOLITE (výrobce CAF, Německo), kterou vidíme na obrázku (Obrázek

5). Rychlost zavážení do pece je maximálně 2,5cm/0,5 min., což vidíme na obrázku (Obrázek 6), jinak hrozí prasknutí spalovací trubice.

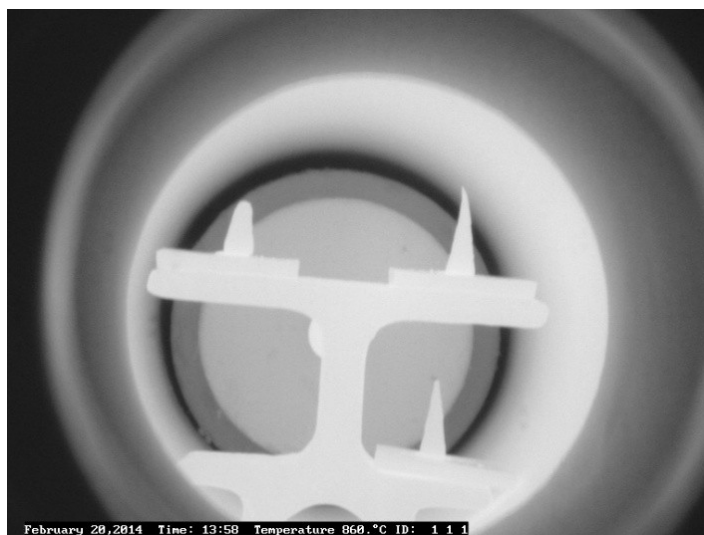


Obrázek 5: Pec CAF Carbolite



Obrázek 6: Zavážení tělísek do pece, foto: Ing. Hana Škrobánková, Ph.D.

Tavení tělísek zavezených do pece jsem pozorovala na připojené obrazovce. Se vzrůstající teplotou se postupně měnil jejich tvar. Tavení čistého popela z biomasy jsem prováděla, kvůli následnému srovnání s přidávkou chemikálií. Při počátku tavení byla teplota ve spalovacím zařízení 860 °C, což vidíme na obrázku (Obrázek 7), přičemž prvotní deformace začala při teplotě 980 °C.



Obrázek 7: Tavení popela z mulčovací kůry

Shrnutí teplot jednotlivých fází tavení popela, je pro větší přehlednost uvedeno v tabulce (Tabulka 7):

Tabulka 7: Teploty tavení popela z mulčovací kůry

DT °C	ST °C	HT °C	FT °C
980	1283	1298	1327

V následující tabulce je charakteristika popela ze zkoumané mulčovací kůry, tyto hodnoty byly naměřeny na termogravimetrického analyzátoru TGA-701(výrobce LECO, Německo):

Tabulka 8: Charakteristika mulčovací kůry

Vlhkost %	Prchavé látky %	Prchavé látky v sušině %	Obsah popela %	Obsah popela v sušině %	Fixní uhlík %	Fixní uhlík v sušině %
6,85	70,85	76,06	3,5	3,75	18,8	20,19
5,19	70,69	74,55	3,8	4,02	20,32	21,43

6. VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ POPELA NA TEPLITU TAVENÍ

Chemické složení popela má velmi významný vliv na jeho teplotu tavení. Mezi nejvýznamnější prvky, které se na změně podílejí, se řadí alkalické kovy, prvky alkalických zemin a fosfor, kterému odborníci přiřkládají vůbec největší vliv. Obecně platí, že čím je větší obsah minerálních látek s vyšším bodem tání, tím vyšší je teplota tání vzorků, větší obsah minerálních látek s nižšími body tání způsobuje snížení teploty tání popela [98]. Abych prokázala vliv chemismu na teplotu tavení popela, vybrala jsem z každé skupiny prvků jeden, ten jsem přimíchala do popela z mulčovací kůry a tuto směs jsem pozorovala při tavení.

6.1. Alkalické kovy

Alkalické kovy jsou zařazeny v 1. skupině periodického systému. Do této skupiny patří: lithium (Li), sodík (Na), draslík (K), rubidium (Rb), cesium (Cs), francium (Fr) [71].

6.1.1. Vlastnosti a použití alkalických kovů

Tyto prvky jsou měkké a dají se krájet nožem, jsou to kovy s nízkou teplotou tání. Jejich základní vlastnosti vidíme v tabulce (Tabulka 9). Mají slabou kovovou vazbu, která je tvořena jen jedním valenčním elektronem. Tato vazba je příčinou jejich nízkých teplot varu a tání a jejich malé hustoty. Kovy jsou v řezu lesklé, avšak na vzduchu se lesk vlivem reakce s kyslíkem a vzdušnou vlhkostí rychle ztrácí [71, 100].

Tabulka 9: Základní vlastnosti alkalických kovů

Vlastnost	Li	Na	K	Rb	Cs	Rb
Molární hmotnost (g.mol^{-1})	6,941	22,989	39,098	85,468	132,905	223
Teplota tání $^{\circ}\text{C}$	180,5	97,8	63,2	39,0	28,5	27
Teplota varu $^{\circ}\text{C}$	1347,0	881,4	765,5	688,0	705,0	677
Hustota v tuhém stavu (kg.dm^{-3})	0,534	0,971	0,862	1,532	1,873	
Tvrdost (Mhosova stupnice)	0,6	0,4	0,5	0,3	0,2	

Alkalické kovy jsou velmi reaktivní. Přímo reagují s vodou, halogenovými prvky, kyslíkem, sírou a s kyselinami. Lithium navíc přímo reaguje s dusíkem za vzniku nitridu lithia (Li_3N) [71, 101].

Lithium se používá při výrobě slitin pro ložiskové kovy jako přísada olova. Pevné a lehké slitiny tvoří s hořčíkem (Mg) a hliníkem (Al), tyto slitiny se pak používají v kosmonautice a letectví.

Sodík se používá při výrobě titanu (Ti), zirkonia (Zr), draslíku (K) a dalších kovů metalotermickou cestou – redukcí jejich chloridů.

Draslík, největší podíl vyrobeného draslíku se používá při výrobě hyperoxidu draselného (KO_2), přímým spalováním draslíku v kyslíku. Hyperoxid se používá jako pomocný zdroj kyslíku v dýchacích přístrojích.

Cesium je důležitým materiálem v televizních kamerách a barevných obrazovkách.

Alkalické kovy, zejména sodík a draslík se v biomase přirozeně vyskytují, ve větší koncentraci než v jiných palivech, v přístupné, mobilní, snadno uvolnitelné formě. Hlavně z travní biomasy se však dají poměrně snadno vyluhovat (více než 80%). Předpokládá se, že díky svým nízkým teplotám varu snižují alkalické kovy teplotu tání popela, ve kterých jsou obsaženy [71, 72, 73].

Při teplené přeměně tuhých paliv, zejména biomasy jsou horké spaliny obvykle kontaminovány alkalickými kovy, to vychází do značné míry z jejich nízké teploty varu a z vysoké reaktivnosti. Tento úkaz může způsobit různé provozní problémy, jako je abraze, koroze a eroze systémových částí, jejich znečištění a tvorba a připékání strusky na teplosměnných plochách. V závislosti na těchto jevech může dojít ke zhoršenému přenosu tepla, ucpávání plynovodů a filtračních systémů a je omezena následná použitelnost popela [47, 74, 75, 76].

6.1.2. Vliv alkalických kovů

Pro zkoumání vlivu alkalických kovů na teplotu tavení popela, jsem zvolila chemicky čistý chlorid draselný p.a. (KCl). Pro dobrou průkaznost vlivu této sloučeniny, jsem zvolila několik hmotnostních koncentrací – 1 %, 10 %, 15 % a 20 %. Jak už bylo zmíněno výše, předpokládá se, že by se měla teplota tavení snížit, díky vlivu draslíku.

Nejprve, před začátkem samotného testování, bylo nutné si připravit testované vzorky. Díky obsahu chloru v používané sloučenině, jsem navážku musela přepočítat,

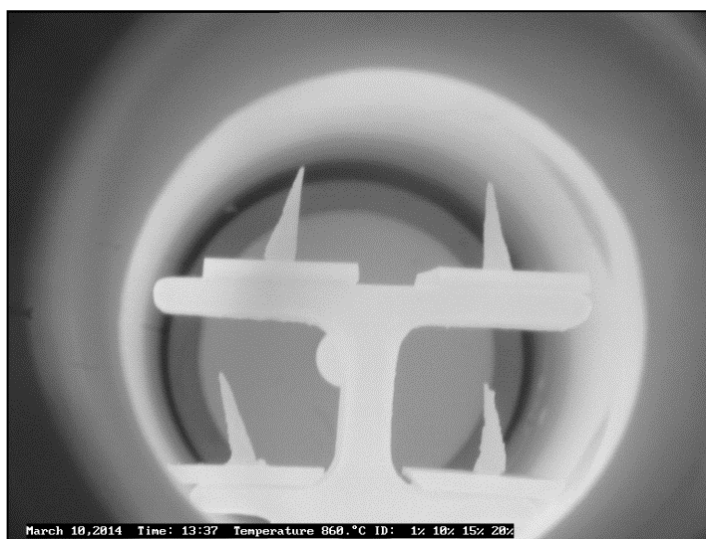
pro zjištění koncentrace samotného K, proto jsem nejdříve vypočítala navážku KCl pro každou koncentraci zvlášť. Navážku jsem zjistila pomocí následujícího vztahu:

$$m_n = m_K \cdot \frac{M_{KCl}}{M_K}$$

kde m_n je hmotnost navážky K (g), m_K je hmotnost draslíku ve 100 g navážky (g), M_{KCl} je molární hmotnost KCl (g/mol) a M_K je molární hmotnost draslíku (g/mol).

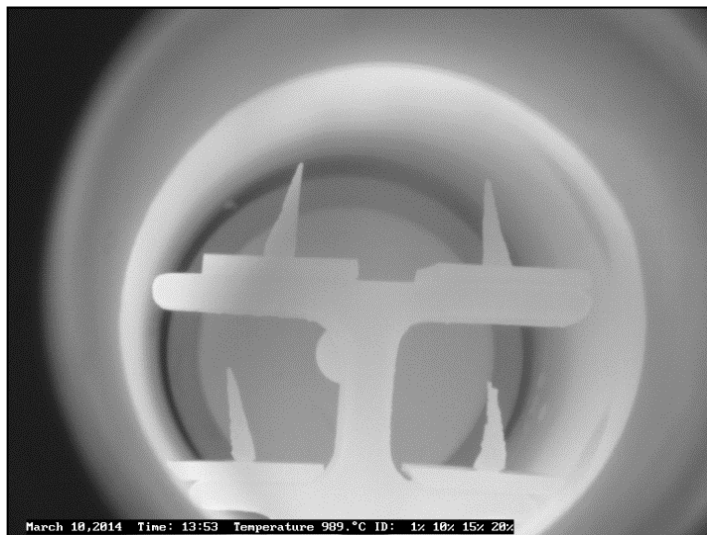
Vypočtené hmotnosti KCl jsem navážila na analytických vahách typu TB – 215 D (výrobce Denver Instrument, Německo), následně jsem každý vzorek doplnila popelem z mulčovací kůry do hmotnosti 1,00 g. Celý postup je popsán v kapitole 5.3. Popel z dřevní štěpky.

Vytvořená tělíska jsem umístila na stojan v pořadí koncentrací: vlevo nahoře 1 %, vpravo nahoře 10 %, vlevo dole 15 % a vpravo dole 20 %. Následné tavení jsem pozorovala na obrazovce. Na obrázku (Obrázek 8) vidíme počáteční stav procesu:



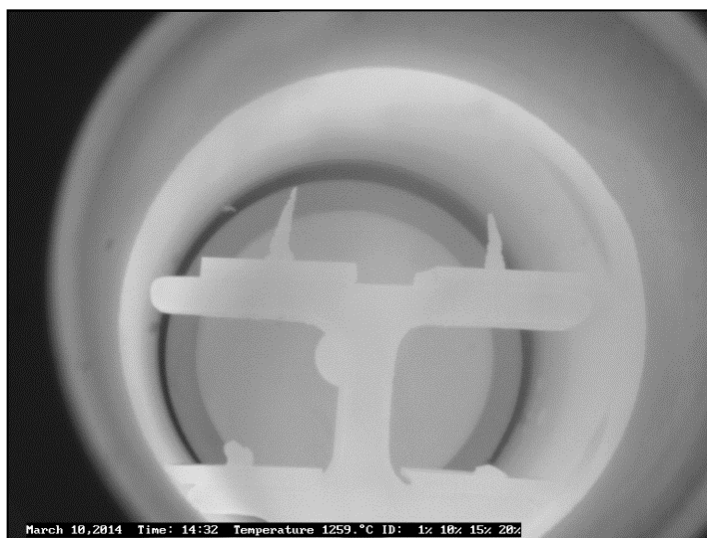
Obrázek 8: Počáteční stav, teplota 860 °C

Na obrázku (Obrázek 9) vidíme začínající deformaci, při teplotě 972 °C se obrazovka mírně zamlžila, jak můžeme vidět i dále:



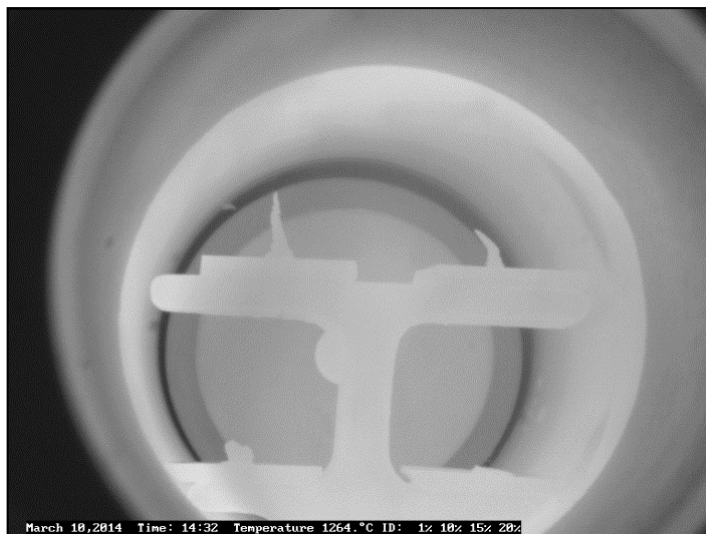
Obrázek 9: Počátek deformace, teplota 989 °C

Na obrázku (Obrázek 10) vidíme, jak proces tavení pokračuje měknutím:



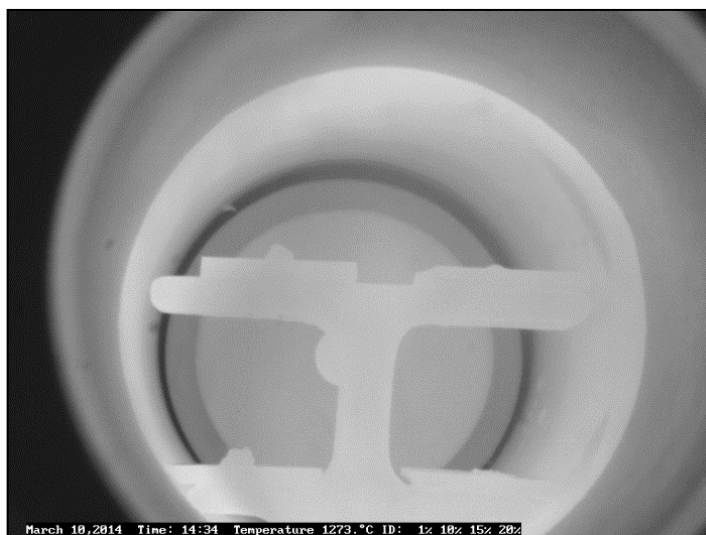
Obrázek 10: Počátek měknutí, teplota 1259 °C

Obrázek 11 ukazuje průběh měknutí:



Obrázek 11: Průběh měknutí, teplota 1264 °C

Na obrázku (Obrázek 12) vidíme konec procesu tavení:



Obrázek 12: Tání, teplota 1273 °C

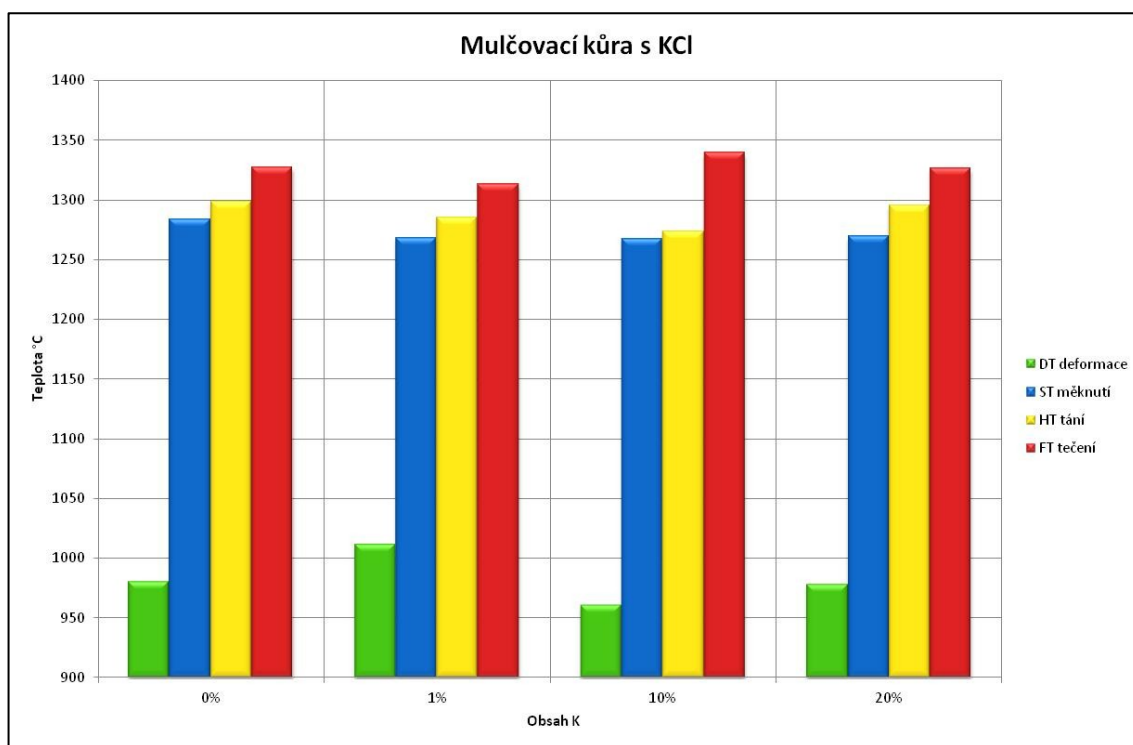
Jak již bylo zmíněno, při teplotě 972 °C se obrazovka zamlžila, to přisuzuji uvolnění KCl do plynného skupenství. Podle literatury je uvolňování K a KCl během zahřívání nad 700 °C až 60 % [77, 78, 79]. Proto na výsledcích z pozorování tavení popele v peci, není vidět významný rozdíl mezi teplotami tavení jednotlivých vzorků. Přehledné zhodnocení dosažených teplot u vzorků s koncentracemi 1 %, 10 % a 20 % je v tabulce (Tabulka 10):

Tabulka 10: Teploty tavení mulčovací kůry s KCl

Koncentrace	DT °C	ST °C	HT °C	FT °C
1 %	1011	1268	1285	1313
10 %	960	1267	1273	1339
20 %	977	1269	1295	1326

Vzorek s koncentrací 15 % není zahrnut do výsledků, z důvodu pozdějšího vyhodnocení všech pozorovaných vzorků.

V následujícím grafu (Graf 1) vidíme vyobrazení výsledků spalování:



Graf 1: Výsledky tavení mulčovací kůry s KCl

6.2. Prvky alkalických zemin

Prvky alkalických zemin jsou zařazeny do 2. skupiny periodické soustavy prvků. Patří sem: beryllium (Be), hořčík (Mg), vápník (Ca), stroncium (Sr), barium (Ba), radium (Ra). Pro poslední čtyři prvky se používá souhrnný název kovy alkalických zemin, jejich společným rysem jsou dva elektrony ve valenčních orbitalech, konfigurace ns^2 [71, 99].

6.2.1. Vlastnosti a použití kovů alkalických zemin

Kovy alkalických zemin mají proti alkalickým kovům vyšší teploty tání, varu a mají vyšší hustotu, jak můžeme vidět v tabulce (Tabulka 11), to je způsobeno dvěma valenčními elektrony, na rozdíl od alkalických kovů. Mezi sebou však mají velmi podobné vlastnosti. Jsou to měkké, reaktivní kovy. Jsou dobrými vodiči tepla i elektrického proudu. Proti alkalickým kovům nejsou až tak reaktivní, ale i přesto se doporučuje je uchovávat v petroleji, se kterým nereagují stejně jako alkalické kovy. Jejich soli barví plamen [71, 72, 100].

Tabulka 11: Základní vlastnosti kovů alkalických zemin

Vlastnost	Be	Mg	Ca	Sr	Ba	Ra
Molární hmotnost (g.mol^{-1})	9,01	24,31	40,08	87,62	137,34	226,03
Teplota tání ($^{\circ}\text{C}$)	1287	649	839	768,0	727	700
Teplota varu ($^{\circ}\text{C}$)	2970	1105	1494	1381	1850	1700
Hustota v tuhém stavu (kg.dm^{-3})	1,8	1,7	1,6	2,6	3,5	5,0
Tvrdost (Mhosova stupnice)	5,0	2,0	1,5	1,8	2,5	

Beryllium je nejméně reaktivní kov z této skupiny. S vodou je nereaktivní. Velmi hojně je používán jako moderátor neutronů v jaderných reaktorech. Prach z jeho sloučenin i z kovového beryllia je karcinogenní a jedovatý.

Hořčík redukuje vodu ve varu na vodík. Na vzduchu oxiduje, čímž vzniká na jeho povrchu „ochranná“ vrstva, tím ztrácí kovový lesk. Používá se v metalotermii při výrobě titanu (Ti), uranu (U) nebo hafnia (Hf). Jeho největší význam je při výrobě lehkých slitin používaných převážně v leteckém, ale i v automobilovém průmyslu jako doplněk hliníku.

Vápník je velmi měkký kov s malou hustotou a vysokou teplotou tání. Ve slitinách s olovem se používá jako ložiskový kov. Podobně jako hořčík se používá při metalotermické výrobě kovů. Jako slitina s křemíkem (CaSi) se používá ke snížení obsahu kyslíku v tekuté oceli.

Stroncium a baryum se používají především jako přísady při výrobě různých slitin [71, 100].

Bylo prokázáno, že popel s vysokým obsahem dřevěné kůry přirozeně obsahuje vyšší procento vápníku, zejména oxid vápenatý (CaO), než popel pouze ze dřeva. Vzhledem k vysoké teplotě varu kovů alkalických zemin, tedy i vápníku, tento obsah

zvyšuje i teplotu tání popela. Kovy alkalických zemin nejsou při spalování popela těkavé, což snižuje možnost zanášení kouřovodů i usazování teplosměnných ploch [80, 81, 101].

6.2.2. Vliv kovů alkalických zemin

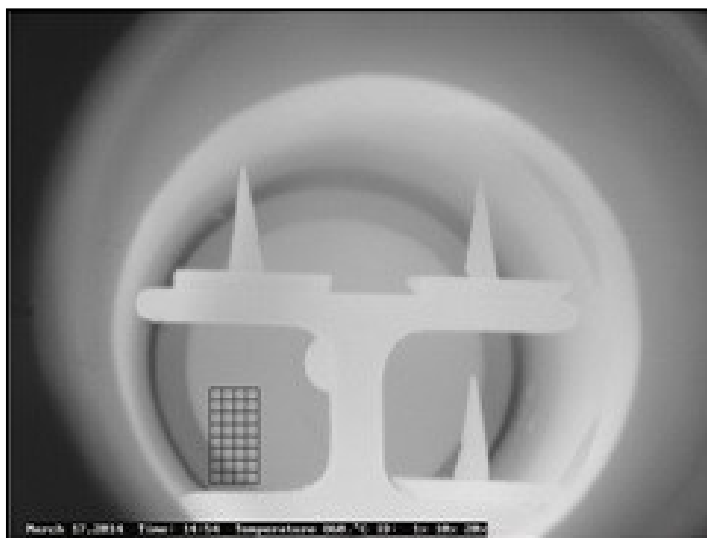
Pro zkoumání vlivu prvků alkalických zemin na teplotu tavení popela, jsem zvolila chemicky čistý oxid vápenatý p.a. (CaO). Aby výsledek nemohl být zkreslený, zvolila jsem proto testování několik hmotnostních koncentrací, které jsem přepočítala pro čisté Ca, 1 %, 10 %, 20 %. Počáteční předpoklad podle dostupné literatury je, že obsah Ca (kovů alkalických zemin) zvýší teplotu tavení. Pro výpočet přesné navážky CaO jsem použila vztah:

$$m_n = m_{Ca} \cdot \frac{M_{CaO}}{M_{Ca}}$$

kde m_n je hmotnost navážky Ca (g), m_{Ca} je hmotnost vápníku ve 100 g navážky (g), M_{CaO} je molární hmotnost CaO (g/mol) a M_{Ca} je molární hmotnost Ca (g/mol).

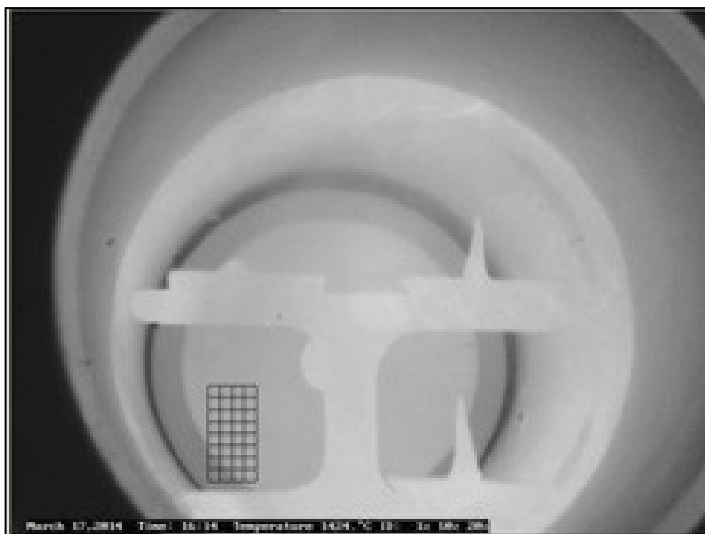
Takto vypočtené hmotnosti jsem navážila na analytických vahách TB – 215 D (výrobce Denver Instrument, Německo), následně jsem každý vzorek doplnila popelem z mulčovací kůry do hmotnosti 1,00 g. Celý postup je popsán v kapitole 5.3. Popel z dřevní štěpky.

Vytvořená tělíska jsem umístila na stojan v pořadí koncentrací: vlevo nahoře 1 %, vpravo nahoře 10 % a vpravo dole 20 %. Následné tavení jsem pozorovala na obrazovce, jak je vidět na obrázcích. Na obrázku (Obrázek 13) vidíme počátek tavení:



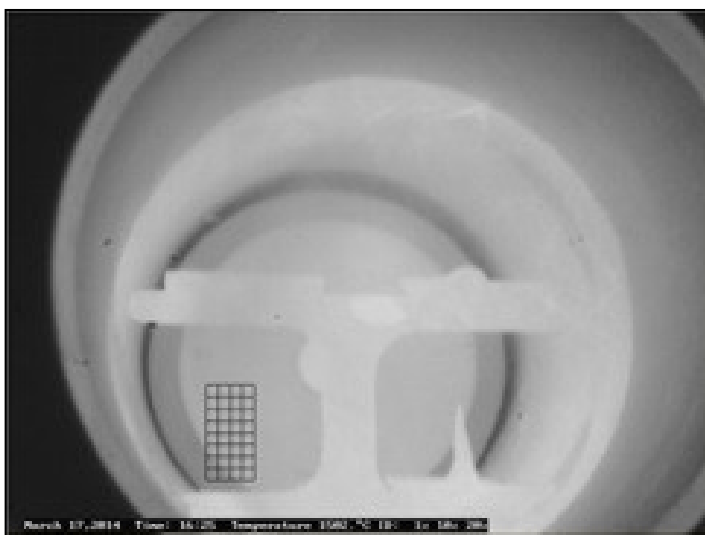
Obrázek 13: Počátek, teplota 900 °C

Na tomto obrázku (Obrázek 14) je vidět měknutí:



Obrázek 14: Počátek měknutí, teplota 1300 °C

A na obrázku (Obrázek 15) je konec tavení:



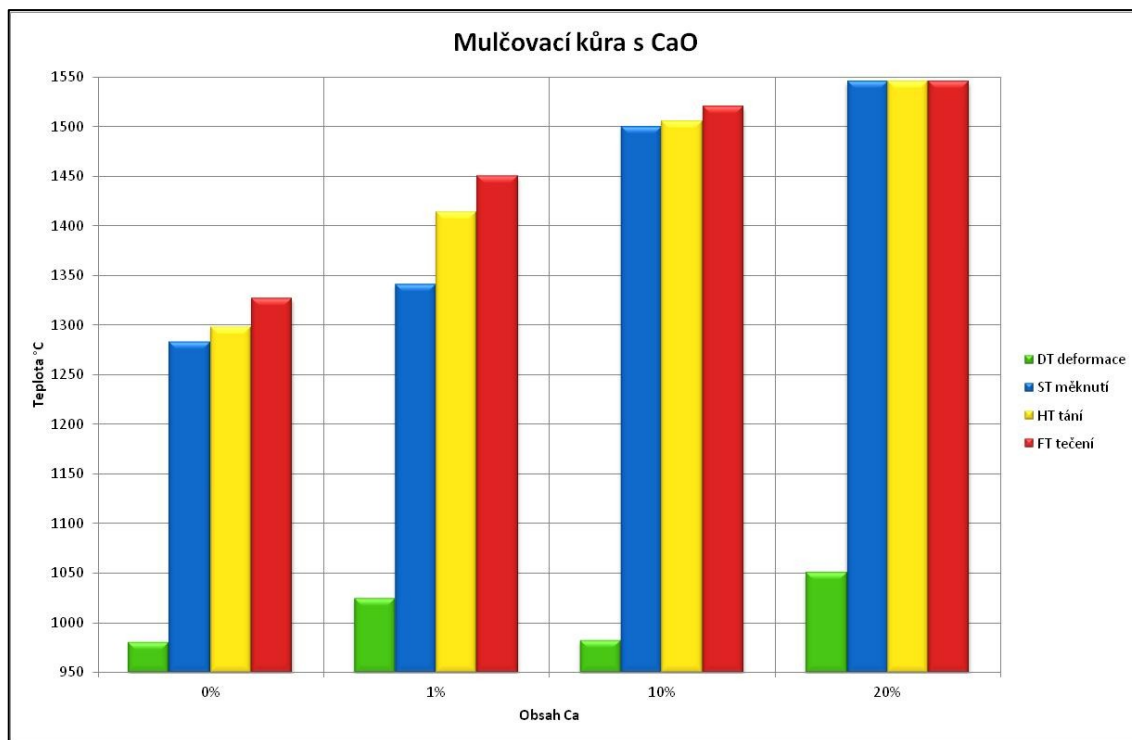
Obrázek 15: Tání až tečení, teplota 1510 °C

Byl splněn předpoklad, že obsah vápníků zvyšuje teplotu tavení popela [80, 81]. Vyhodnocení teplot tavení všech vzorků je uvedeno v následující tabulce (Tabulka 12):

Tabulka 12: Teploty tavení mulčovací kůry s CaO

Koncentrace	DT °C	ST °C	HT °C	FT °C
1 %	1024	1341	1414	1450
10 %	982	1500	1505	1520
20 %	1050	1545	1545	>1545

V následujícím grafu (Graf 2) jsou vyobrazeny výsledky spalování:



Graf 2: Výsledky tavení mulčovací kůry s CaO

6.3. Další chemické prvky - fosfor

Fosfor je nekovový prvek, který se v přírodě vyskytuje pouze ve formě sloučenin. Společně s chlorem (Cl), bromem (Br), jodem (I) a astatem (At) se řadí do 17. skupiny (VIIa skupina).

6.3.1. Vlastnosti a použití fosforu

Fosfor se běžně vyskytuje ve třech modifikacích jako bílý, červený a černý fosfor.

Bílý fosfor je nerozpustná voskově měkká a průsvitná látka, ovšem je rozpustná v sirouhlíku (CS_2), benzenu a v organických rozpouštědlech. Na vzduchu je bílý fosfor nestálý a samovznítitelný, proto se uchovává pod vodou. Jeho páry fosforeskují, je silně jedovatý. V alkalické prostředí podléhá velmi snadno hydrolýze, při vzniku fosfanu (PH_3), který je bezbarvý, jedovatý plyn. Bílý fosfor se používá k výrobě farmaceutických preparátů a díky jeho jedovatosti k hubení krys [82, 83, 84].

Červený fosfor vzniká zahříváním bílého fosforu za nepřístupu vzduchu na teplotu asi 260 °C. Podle způsobu přípravy má různé barevné modifikace od tmavočervené po

fialovou. Červený fosfor je velmi tvrdá, málo reaktivní látka, není rozpustná ve vodě ani v organických rozpouštědlech. Na rozdíl od bílého není jedovatý. Používá se především k výrobě zápalek a jako výchozí sloučenina pro přípravu naprosté většiny sloučenin obsahujících fosfor.

Černý fosfor také se mu říká kovový. Ze všech modifikací fosforu je nejméně reaktivní, avšak je velmi dobře tepelně elektricky vodivý. Je to kovově lesklá krystalická látka. Stejně jako červený fosfor není jedovatý a není rozpustný ve vodě ani v organických rozpouštědlech. Díky své dobré vodivosti se využívá v elektrotechnice k výrobě polovodičů [82, 83, 84].

Studie prokázaly, že obsah fosforečnanů v popelu silně ovlivňuje jak fyzikální, tak i chemické vlastnosti popela při tavení. Význam vlivu fosforu na teplotu tavení popela není v literatuře jednotný. Odborníci se shodují, že záleží na dalším chemickém složení popela, jelikož při zahřívání fosfor často reaguje s příměsemi v popelu. Například obsahuje-li popel Ca, pak s ním fosfor reaguje a teplota tání se snižuje. Ovšem předpokládá se, že ve směsi popela, kde není žádná příměs, bude fosfor případně fosforečnany teplotu tání zvyšovat [85, 86, 87].

6.3.2. Vliv fosforu

Pro testování vlivu obsahu fosforu na tavitelnost popela jsem zvolila chemicky čistý hydrogenfosforečnan draselný p.a. (K_2HPO_4), pro který jsem zvolila tři charakteristické hmotnostní koncentrace 1 %, 10 % a 20 %. Jak už se ukázalo u testování chloridu draselného (KCl), draslík se při teplotě přibližně 700 °C odpaří do plynné fáze. Tudíž draslík obsažený v K_2HPO_4 nemá na další vývoj tavení vliv.

Pro výpočet navážky K_2HPO_4 jsem použila následující rovnici:

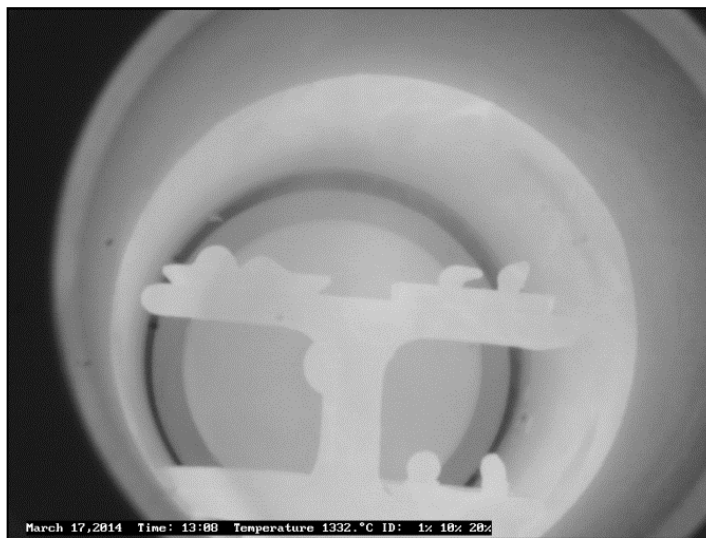
$$m_n = m_p \cdot \frac{M_{K_2HPO_4}}{M_P}$$

kde m_n je hmotnost navážky K_2HPO_4 (g), $m_{K_2HPO_4}$ je hmotnost fosforu ve 100 g navážky (g), $M_{K_2HPO_4}$ je molární hmotnost K_2HPO_4 (g/mol), M_P je molární hmotnost fosforu (g/mol).

Vypočtené hmotnosti jsem navážila na analytických vahách TB – 215 D (výrobce Denver Instrument, Německo), následně jsem každý vzorek doplnila popelem z mulčovací kůry do hmotnosti 1,00 g. Celý postup je popsán v kapitole 5.3. Popel z dřevní štěpky.

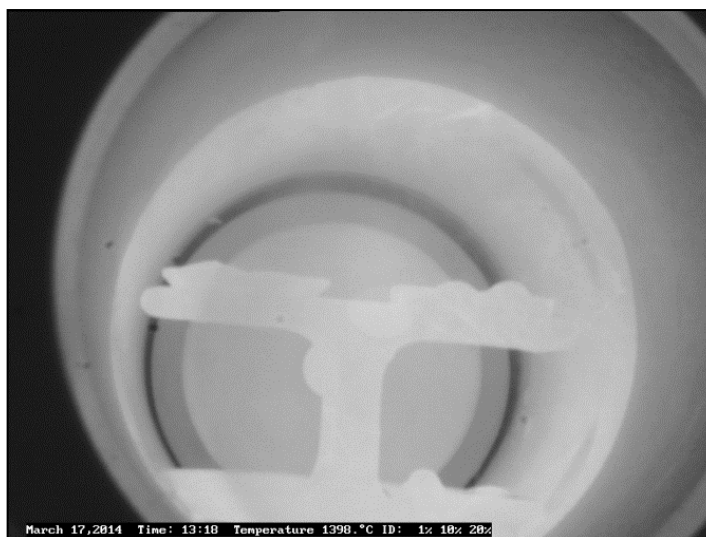
Vytvořená tělíska jsem umístila na stojan v pořadí koncentrací: vlevo nahoře 1 %, vpravo nahoře 10 % a vlevo dole 20 %. Následné tavení jsem pozorovala na obrazovce.

Na obrázku (Obrázek 16) vidíme tavení popela:



Obrázek 16: Tání, teplota 1332 °C

Na obrázku (Obrázek 17) je vidět konec procesu tavení, tedy tečení:



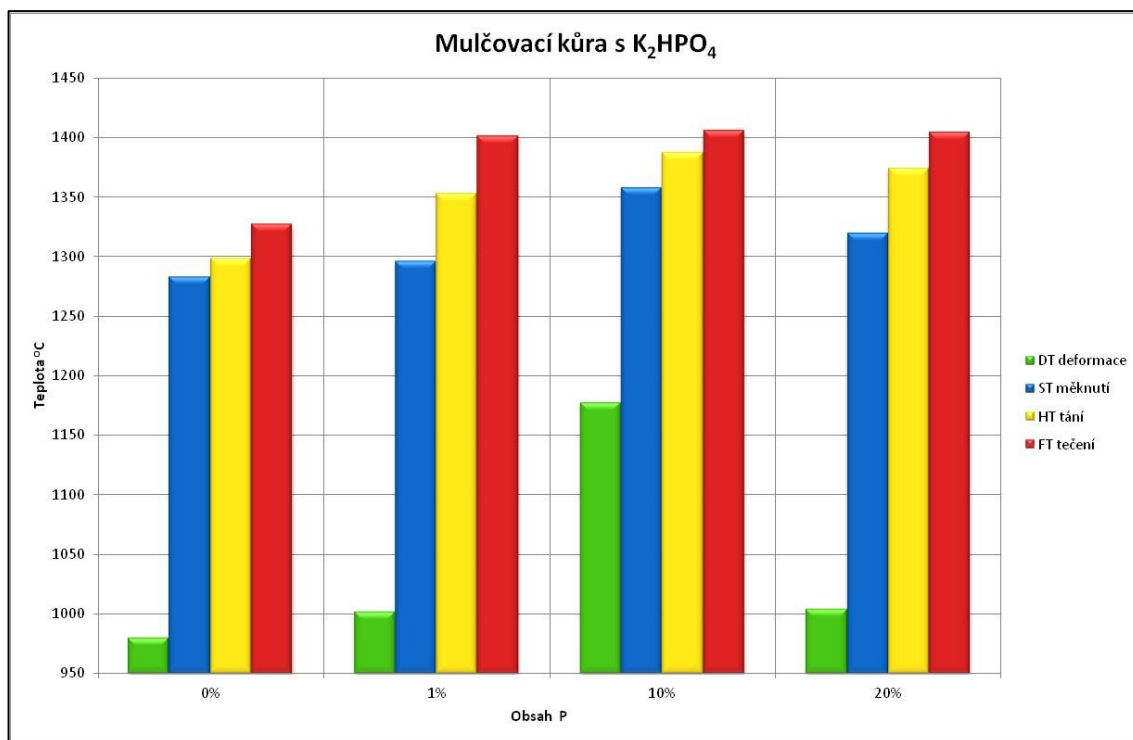
Obrázek 17: Tečení, teplota 1398 °C

Celkové vyhodnocení tavení popela z mulčovací kůry s přidavkem hydrogenfosforečnanu vápenatého je v následující tabulce (Tabulka 13):

Tabulka 13: Teploty tavení mulčovací kůry s K_2HPO_4

Koncentrace	DT °C	ST °C	HT °C	FT °C
1 %	1002	1296	1353	1401
10 %	1177	1357	1387	1406
20 %	1004	1319	1374	1404

V následujícím grafu (Graf 3) jsou vyobrazeny výsledky tavení:



Graf 3: Výsledky tavení mulčovací kůry s K_2HPO_4

7. UKAZATELE TVORBY USAZENIN PŘI SPALOVÁNÍ BIOMASY

Chování popelovin biomasy a tendence jejich depozice mohou být předvídány pomocí empirických ukazatelů. Tvorba usazenin je typická pro veškerou biomasu, ale liší se poměry, které záleží na složení biomasy a obsahu popelovin, dřevo netvoří takové usazeniny jako traviny, protože při stejné rychlosti spalování vstupuje do spalovací komory méně popelovin a dřevo má také příznivější složení pro spalování z hlediska tvorby usazenin [95, 103].

7.1. Alkalický index

Jeden z nejjednodušších ukazatelů je alkalický index, který slouží jako indikátor tvorby usazenin a inkrustů ve spalovacích zařízeních [104]. Alkalický index vyjadřuje množství alkalických oxidů v palivu na jednotku energie paliva [103]:

$$AI = \frac{\text{kg (K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O)}}{\text{GJ}}$$

V případě, že je hodnota alkalického indexu (AI) > 0,17 kg alkálií/GJ je tvorba usazenin pravděpodobná, nad 0,34 kg alkálií/GJ je jistá [105].

7.2. Další ukazatele

Jedním z nejzákladnějších ukazatelů, korelujících rovnováhu zásaditých a kyselých oxidů je $R_{B/A}$ index:

$$R_{B/A} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}$$

Hodnota indexu $R_{B/A} > 0,5$ indikuje potenciál ke tvorbě inkrustů [105]. Nicméně tento index není vhodným ukazatelem pro biomasu, jelikož se při jeho výpočtu nezohledňuje obsah draslíku, který je jedním z hlavních prvků zapříčiňujících tvorbu usazenin a inkrustů. Proto se tento ukazatel pro použití na biomasu upravil a udává se jako Index tvorby usazenin neboli Fouling index (F_u). Základ výpočtu stále tvoří $R_{B/A}$ index, nicméně jsou v něm navíc zahrnuty i alkalické prvky, které přednostně tvoří usazeniny [95]:

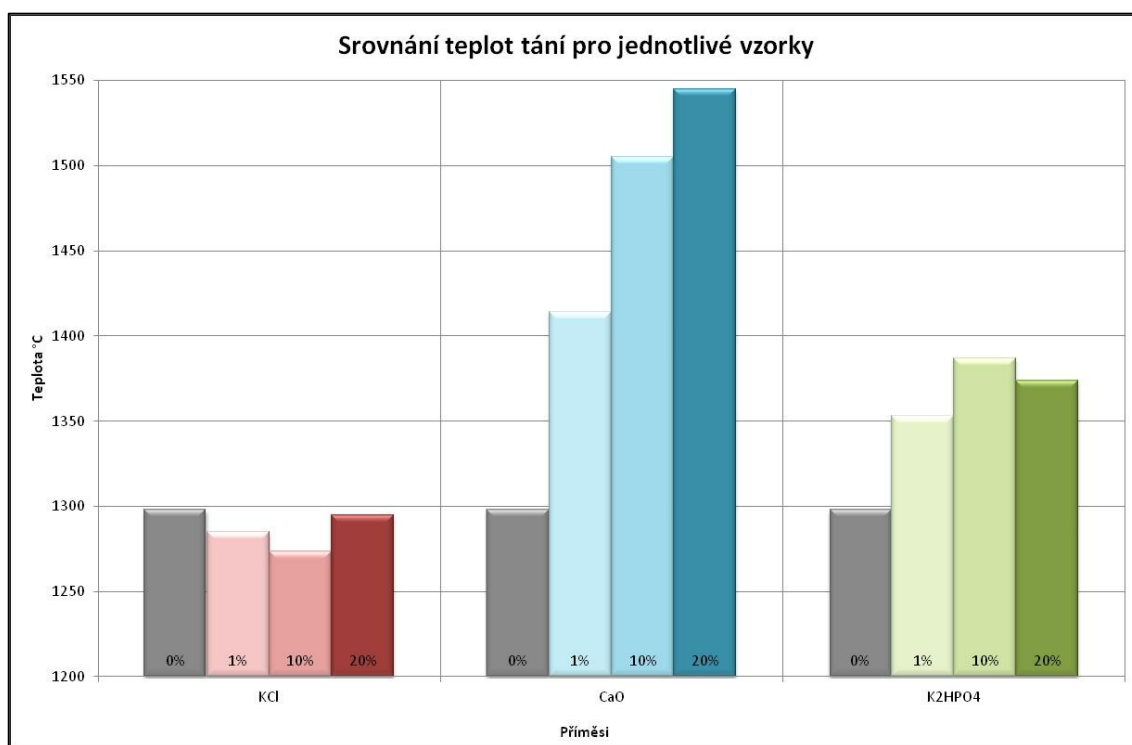
$$F_u = R_{B/A} \cdot (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$$

Pokud je hodnota F_u menší než $< 0,6$ pak existuje pouze nízká pravděpodobnost tvorby inkrustů, u hodnot v rozmezí $0,6 - 40$ je pravděpodobnost tvorby inkrustů vysoká a při hodnotě nad 40 je pravděpodobnost tvorby inkrustů extrémně vysoká [104].

8. VYHODNOCENÍ A ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabývala hodnocením vlivu změny chemického složení popela z mulčovací kůry na jeho teplotu tavení. Pro posouzení tohoto vlivu jsem jako příměsi zvolila alkalický kov draslík, ve formě chloridu draselného (KCl), který by měl teplotu tání snížit, dále kov alkalických zemin vápník, ve formě oxidu vápenatého (CaO), který by měl teplotu tání zvýšit a poslední zvolená příměs byl fosfor, který by měl ve sloučenině hydrogenfosforečnanu draselného (K_2HPO_4) teplotu tání mírně zvýšit. Všechny tyto příměsi jsem nejprve přepočítala na obsah potřebných prvků pro koncentrace 1 %, 10 %, 20 %.

Tyto předpoklady byly splněny, jak můžeme vidět v následujícím grafu (Graf 4), který ukazuje vyhodnocení všech zkoumaných vzorků popela z biomasy pro vybrané koncentrace, při teplotě tání. Jednotlivé příměsi jsou vždy doplněny o nulovou hodnotu, která zobrazuje teplotu tání čisté mulčovací kůry, pro lepší přehlednost porovnávaných výsledků.



Graf 4: Celkové vyhodnocení tání mulčovací kůry

Jak tedy vidíme v grafu, příměs chloridu draselného teploty tání popela z mulčovací kůry příliš neovlivnila v žádné koncentraci. Tento fakt je způsoben tím, že KCl

při teplotě kolem 900 °C vyprchal do plynné fáze, tento jev způsobil také zamlžení sklíčka na objektivu ve spalovací peci.

Další zvolenou příměsí byl oxid vápenatý (CaO), který potvrdil předpoklady, že s rostoucí koncentrací ve směsi roste také teplota tání popela. Zvyšující se teplota tání s příměsí CaO je žádaná a je tedy považována za pozitivní, jelikož vyšší teplota zmenšuje pravděpodobnost vzniku inkrustů a nánosů na teplosměnných plochách ve spalovacím zařízení.

Poslední studovanou příměsí byl K_2HPO_4 , který stejně jako CaO splnil předpoklad, že s rostoucí koncentrací poroste i teplota tání popela z mulčovací kůry. Avšak podle výsledků jednotlivých koncentrací vidíme, že při koncentraci 20 %, teplota tání mírně klesla, což můžeme připsat nepřesnosti měření, které se mohou u tohoto pozorování vyskytnout, ale vzhledem k velmi malé odchylce tuto nepřesnost do výsledků nezahrnujeme.

V této práci je také kapitola o alkalickém indexu, který se počítá pro určení pravděpodobnosti tvorby usazenin a inkrustů. Já jsem ovšem alkalický index nepočítala. Po výsledcích z praktického spalování popela, kde byly splněny předpoklady vlivu chemických příměsí na tavitelnost popela, a jelikož není známo přesné chemické složení mulčovací kůry, není tento údaj nezbytný pro celkové hodnocení.

Pro zkoumanou mulčovací kůru byl udělán rozbor jejích základních charakteristik, což je důležitý ukazatel, který ovlivní charakter popela z mulčovací kůry. Tento rozbor byl proveden dvakrát pro lepší vypovídající hodnotu. Byla změřena vlhkost, která je poměrně nízká, v rozmezí 5,19 – 6,85 %. Dále byl změřen obsah prchavých látek, který vyšel v rozmezí 70,69 – 70,85 %, obsah prchavých látek v sušině 74,55 – 76,06 %, obsah popelovin byl naměřen 3,5 – 3,8 %, obsah popela v sušině 3,75 – 4,02 % a fixní uhlík 18,8 – 20,32 %, fixní uhlík v sušině 20,19 – 21,43 %. A jako poslední bylo změřeno spalné teplo mulčovací kůry na kalorimetru, které mělo hodnotu 21 716 J/g.

Cílem této práce bylo prozkoumat vliv chemického složení popela na jeho teplotu tavení. Nejdříve jsem provedla rešeršní zpracování energetického využití biomasy, jejího základního chemického složení a důvody proč vznikají inkrusty a nánosy na teplosměnných plochách spalovacích zařízení. V praktické části jsem se podrobně zabývala vlivem změny chemického složení popela z mulčovací kůry na jeho teplotu

tavení. Pro zjištění vlivu jsem vybrala alkalický kov, kov alkalických zemin a fosfor. U těchto příměsí byl předpoklad, že každá bude mít na výslednou teplotu jiný vliv. Tento předpoklad se potvrdil.

Jako zástupce alkalických kovů jsem použila draslík ve formě KCl, ten však ze směsi vyprchal do plynné fáze při nízké teplotě, tudíž výsledek neovlivnil. Z kovů alkalických zemin jsem vybrala vápník ve formě CaO, který splnil předpoklad a teplotu tavení zvýšil, což je pozitivní jev. Vliv fosforu na teplotu je ovlivněn tím, v jaké sloučenině se nachází, v této práci byl použit ve formě K_2HPO_4 , kde se předpokládalo, že teplotu mírně zvýší, což se stejně jako u vápníku potvrdilo.

ZDROJE

- [1] HALL, D. O., ROSILLO-CALLE, F., WILLIAMS R.H., a WOODS, J. Renewable energy: sources for fuels and electricity. *Biomass for energy: supply prospects*. [rev. printing]. London: Earthscan. 1993. ISBN 1-85383-155-7.
- [2] GOLDEMBERG, J., JOHANSSON, T. *World energy assessment: Overview 2004 update*. New York: United Nations Development Programme, Bureau for Development Policy. 2004. ISBN 92-112-6167-8.
- [3] JUNGINGER, M., DE VISSER, E., HJORT-GREGERSEN, K., KOORNNEEF, J., RAVEN, J., FAAIJ, A., TURKENBURG, W. Technological learning in bioenergy systems. *Energy Policy*. Nizozemí: Elsevier. 2006, vol. 34, no. 18, pp. 4024-4041.
- [4] HAMELINCK, C., SUURS, R., FAAIJ, A. *International bioenergy transport costs and energy balance*. Nizozemí: Utrecht University. 2003, vol. 29, pp. 114-134. ISBN 90-393-3508-7.
- [5] HAMELINCK, C., FAAIJ, A. Outlook for advanced biofuels. *Energy Policy*. Nizozemí: Elsevier. 2006, vol. 34, no. 17, pp. 3268-3283.
- [6] GOLDEMBERG, J. *World energy assessment: energy and the challenge of sustainability*. New York, NY: United Nations Development Programm. 2000, ISBN 92-112-6126-0.
- [7] VAN DER BROEK, R. Sustainability of biomass electricity systems. Department of Science, *Technology & Society*. Nizozemí: Utrecht University. 2000, pp. 216.
- [8] HOOGWIK, M., FAAIJ, A., VAN DER BROEK, R., BERNDES, G., GIELEN, D., TURKENBURG, W. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass and Bioenergy*. Nizozemí: Elsevier. 2003, vol. 25, no. 2, pp. 119-133.
- [9] FAAIJ, A. Biomass combustion. *Encyclopedia of Energy*. Scopus. 2004, vol. 1, no. 2, pp. 175-191.
- [10] NAKIĆENOVIĆ, N. *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press. 2000, pp. 599. ISBN 05-218-0493-0.
- [11] FAAIJ, A. Bio-energy in Europe: changing technology choices. *Energy Policy*. Nizozemí: Elsevier. 2006, vol. 34, no. 3, pp. 322-342.

- [12] CONTI, J. J. *Energy Information Administration: International Energy Outlook*. Washingt D.C.: U.S. Department of Energy. 2006, pp. 202.
- [13] CLEVELAND, C., AYRES, R. *Encyclopedia of energy*. Boston: Elsevier Academic Press. 2004. ISBN 01217648696.
- [14] EUROPEAN COMMISSION. *Directive of the European Parliament and of the Council*. Brusel: SWD. 2012.
- [15] Commission of european communities: White Paper for a Community Strategy and Action Plan. *Energy for future: renewable source of energy*. Brusel: COM. 1997.
- [16] Energy is Sweden. *The Swedish National Board for Industry and Technology*. 1996, vol. 24.
- [17] NAKICENOVIC, R. *Emissions Scenarios*. UK: Cambridge Uneversity Press. 2000, p. 570.
- [18] HAMELINCK, C., FAAIJ, A. *International sugar journal: Production of advanced biofuels*. UK: Cabi. 2006, no. 108, pp. 168-175. ISSN 0020-8841.
- [19] JOHANSSON, T., WILLIAMS, R., ISHITANI, H., EDMONDS, J. Options for reducing CO₂ emissions from the energy supply sector. *Energy Policy*. UK: Elsevier. 1996, vol. 24, no. 10-11, pp. 985-1003.
- [20] IIASA/WEC (Ed.), *Global Energy Perspectives*, Cambridge University Press, Cambridge. 1998.
- [21] DORNBURG, V., TERMEER, G., FAAIJ, A. Economic and greenhouse gas emission analysis of bioenergy production using multi-product crops — case studies for the Netherlands and Poland. *Biomass & Bioenergy*. 2005, vol. 28, no. 5, pp. 454–474.
- [22] DAMEN, K. J., FAAIJ, A. P. C. A life cycle inventory of existing biomass import chains for “green” electricity production. Department of Science, *Technology and Society*. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University. 2003, p. 61.
- [23] FAAIJ, A., MEULEMAN, B., TURKENBURG, W., VAN WIJK, A. Rosillo-Calle et al. Externalities of biomass based electricity production compared with power generation from coal in the Netherlands. *Biomass & Bioenergy*. 1998, vol. 14, no. 2, pp. 125–147.
- [24] SPLIETHOFF, H. Hein Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces. *Fuel. Processing Technology*. 1998, vol. 54, no. 1–3, pp. 189–205.

- [25] OBERNBERGER, I. Decentralized biomass combustion: state of the art and future development. *Biomass and Bioenergy*. 1998, vol. 14, pp. 33–56.
- [26] NUSSBAUMER, T. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & Fuels*. 2003, vol. 17, no. 6, pp. 1510–1521.
- [27] BEC Biomass. Energy Centre. Surrey. 2008 www.biomassenergycentre.org.uk.
- [28] WILLIAMS, G. H. Fuel from biomass. *Chemical & Engineering News*. 1992, vol. 70, no. 47, p. 3.
- [29] JENKINS, B. M., BAXTER, L. L., MILES Jr, T. R., MILES, T. R. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. 1998, vol. 54, no. 1–3, pp. 17–46.
- [30] WILLIAMS, A., POURKASHANIAN, M., JONES, J. M. Combustion of pulverised coal and biomass. *Energy and Combustion Science*. 2001, vol. 27, no. 6, pp. 587–610.
- [31] SCHULTZ, T. P., TAYLOR, F.W. Wood Gordon and Breach, New York. 1989.
- [32] FAAIJ, A., VAN DOORN, J., CURVERS, T., WALDHEIM, L., OLSSON, E., VAN WIJK A., DAEY-OUWENS, Cees. Characteristics and availability of biomass waste and residues in the Netherlands for gasification. *Biomass and Bioenergy*. 1997, vol. 12, no. 4, pp. 225–240.
- [33] DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Energy and Combustion Science*. 2004, vol. 30, no. 2, pp. 219–230.
- [34] DEMIRBAS, A. Fuel and combustion properties of bio-wastes. *Energy Sources*. 2005, vol. 27, no. 5, pp. 451–462.
- [35] JENSEN, P. A., SANDER, B., DAM-JOHANSEN, K. Pretreatment of straw for power production by pyrolysis and char cash. *Biomass and Bioenergy*. 2001, vol. 20, pp. 431–446.
- [36] WERTHER, J., SAENGER, M., HARTGE, E. U., OGADA, T., SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. *Energy and Combustion Science*. 2001, vol. 26, no. 1, pp. 1–27.
- [37] WILEN, C., STAHLBERG, P., SIPILA, K., AHOKAS, J., LONDON, X. Pelletization and Combustion of Stra. *Applied Science*. 1987.
- [38] BALATINECZ, J. J. The Potential of Densification in Biomass. *Utilization Plenum Press*. 1983.

- [39] ALLICA, J. H., MITRE, A. J., BUSTAMANTE, J. A. G., ITOIZ, C., BLANCO, F., ALKORTA, I. Straw quality for its combustion in a straw-fired power plant. *Biomass and Bioenergy*. 2001, vol. 21, no 4, pp. 249–258.
- [40] DEMIRBAS, A. Yields of hydrogen-rich gaseous products via pyrolysis from selected biomass samples. *Fuel*. 2001, vol. 80, no. 13, pp. 1885–1891.
- [41] JENKINS, B. M., BAKKER, R. R., GILMER, J., WEI, J. B. Combustion Characteristics of Leached Biomass. *Thermochemical Biomass Conversion*. 1996.
- [42] DEMIRBAS, A. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004, vol. 71, no. 2, pp. 803–815.
- [43] OBERNBERGER, I., BRUNNER, T., BARNTHALER, I. Chemical Properties of Solid Biofuels - Significance and Impact. *Biomass and Bioenergy*. 2006, vol. 27, pp. 653–669.
- [44] SINGH, S., RAM, L. C., MASTO, R. E., VERMA, S. A comparative evaluation of minerals and trace elements in the ashes from lignite, coal refuse, and biomass fired power plants. *International Journal of Coal Geology*. 2011, vol. 87, no. 2, pp. 112–120. ISSN 0166-5162.
- [45] NUTALAPATI, D., GUPTA, R., MOGHADERI, B., WALL, T. F. Assessing slagging and fouling during combustion: A thermodynamic approach allowing for alkali/ash reactions. *Fuel Processing Technology*. 2007, vol. 88, no. 11–12, pp. 1044–1052. ISSN 0378-3820.
- [46] KASSMAN, H., BROSTROM, M., BERG, M., ÅMAND, L. E. Measures to reduce chlorine in deposits: Application in a large-scale circulating fluidised bed boiler firing biomass. *Fuel*. 2011, vol. 90, no. 4, pp. 1325–1334. ISSN 0016-2361.
- [47] KHAN, A. A., JONG W., JANSSENS, P. J., SPLIETHOFF, H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*. 2009, vol. 90, no. 1, pp. 21 – 50. ISSN 0278 – 3820.
- [48] RYBÍN, M.: *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. Praha: SNTL, 1985. 520 s. ISBN 04-227-85.
- [49] JONES, J. M., DARVELL, L. I., BRIDGEMAN, T. G., POURKASHANIAN, M., WILLIAMS, A. An investigation of the thermal and catalytic behaviour

- of potassium in biomass combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007, vol. 31, no. 2, pp. 1955-1963. ISSN 1540-7489.
- [50] JOHANSSON, L. S.; TULLIN, C.; LECKNER, B.; SJOVALL, P. Particle emission from biomass combustion in small combustors. *Biomass and Bioenergy*. 2003, vol. 25, no. 4, pp. 435-446. ISSN 0961-9534.
- [51] THY, P., JENKINS, B. M., GRUNDTVIG, S., SHIRAKI, R., LESHER, C. E. High temperature losses and mineralogical changes in common biomass ashes. *Fuel*. 2006, vol. 85, no. 5-6, pp. 783-795. ISSN 0016-2361.
- [52] MALAŤÁK, J., VACULÍK, P. *Biomasa pro výrobu energie*. První. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2008, 206 s. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [53] JUCHELKOVÁ, D., RACLAVSKÁ, H. (2009): Biomasa multimediální CD-ROM.
- [54] XIAO, R., CHEN, X., WANG, F., YU, G. The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature. *Renewable Energy*. 2011, vol. 36, no. 1, pp. 244-249. ISSN 0960-1481.
- [55] DAHL, O., NURMESNIEMI, H., POYKIO, R., WATKINS, G. Comparison of the characteristics of bottom ash and fly ash from a medium-size (32 MW) municipal district heating plant incinerating forest and peat in a fluidized-bed boiler. *Fuel Processing Technology*. 2009, vol. 90, no. 7-8, pp. 871-878. ISSN 0378-3820.
- [56] BALÁŠ, M., MOSKALÍK, J. *Biom.cz* [online]. 24.1.2011 [cit. 2014-03-15]. Měření vlhkosti paliv. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mereni-vlhkosti-paliv>>. ISBN 978-80-214-4027-2.
- [57] ŠIMKOVÁ, L., KADLEC, J. Podmínky pro recyklaci dřevního popela. *Odpady*. 2007, roč. 17, č. 9, s. 12-13.
- [58] VOLÁKOVÁ, P. *Biom.cz* [online]. 14.4.2010 [cit. 2014-03-13]. Biomasový popel – prvkové složení a možnosti jeho využití. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasovy-popel-prvkove-slozeni-a-moznosti-jeho-vyuziti>>.
- [59] KAJAN, M.: Bioplyn z odpadů živočišné výroby. *Biom.cz* [online]. 2005-08-23 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z www: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplyn-z-odpadu-zivocisne-vyroby>>. ISSN: 1801-2655.
- [60] HŘEBÍČEK, J., HEJČ, M., PILIAR, F., ZHYLTSOVÁ, J. Identifikace a posouzení efektivnosti systémů nakládání s BRO v ČR a v zemích EU, DEKONT INTERNATIONAL, s.r.o. 2006, 151 s.

- [61] Slovník. *Vítejte na Zemi...*[online]. 2008 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://www.vitejenazemi.cz/slovník/index.php?article=734>.
- [62] PASTOREK, Z., KÁRA, J., JEVIČ, P. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public. ISBN 80-865-3406-5.
- [63] MURTINGER, K., BERANOVSKÝ, J. *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno, 2011, 106 s. Stavíme. ISBN 978-80-251-2916-6.
- [64] FAHMI, R., BRIDGWATER, A. V., DARVELL, L. I., JONES, J. M., YATES, N., THAIN, S., DONNISON, I. S. The effect of alkali metals on combustion and pyrolysis of Lolium and Festuca grasses, switchgrass and willow. *Fuel*. 2007, vol. 86, no. 10-11, pp. 1560-1569.
- [65] ASADIERAGHI, M., DAUD., W. M. A. Characterization of lignocellulosic biomass thermal degradation and physiochemical structure: Effects of demineralization by diverse acid solutions. *Energy Conversion and Management*. 2014, vol. 82, pp. 71-82.
- [66] RACLAVSKÁ, H., FRYDRYCH, J., ANDERT, D.: Význam popelovin v travní biomase pro energetické účely. *Biom.cz* [online]. 2013-09-23 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z [www: <http://www.biom.cz/cz/odborne-clanky/vyznam-popelovin-v-travni-biomase-pro-energeticke-ucely>](http://www.biom.cz/cz/odborne-clanky/vyznam-popelovin-v-travni-biomase-pro-energeticke-ucely). ISSN: 1801-2655.
- [67] VOLFOVÁ, M.: *Výzkum energetické využitelnosti kompostů*. Ostrava, 2012. 134 s. Dizertační práce. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava.
- [68] BACKMAN, R., SKRIFVARS, B. J., YRJAS, P.: The influence of aerosol particles on the melting behaviour of ash deposits in biomass-fired boilers. *Aerosols in Biomass Combustion*. Graz. 2005.
- [69] MILES, T. R., MILES, T. R., BAXTER, L. L., BRYERS, R. W., JENKINS, B. M., ODEN, L. L. Alkali deposits found in biomass power plant: a preliminary study of their extent and nature. *National Renewable Energy Laboratory*. Co. USA. 1995.
- [70] HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., BRANC, M., STRAKA, F., BURYAN, P., KUBESA, P., HOPAN, F., KRPEC, K. Problematika stanovení charakteristických teplot tavitelnosti popela biomasy. *Chemické listy*. 2013, č. 107, s. 502-509.
- [71] LEŠKO, J., TRŽIL, J., a ŠTARHA, R. *Anorganická chemie*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, 254 s. ISBN 978-80-248-2398-0.

- [72] KEOWN, D. M., FAVAS, G., HAYASHI, J., LI, CZ. Volatilisation of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis of biomass. *Bioresource Technology*. 2005, vol. 96, no. 14, pp. 1570-1577.
- [73] FAAIJ, A., REE, R., WALDHEIM, L., OLSSON, E., OUDHUIS, A., WIJK A., DAEY-OUWENS C., TURKENBURG, W. Gasification of biomass wastes and residues for electricity production. *Biomass and Bioenergy*. 1997, vol. 12, no. 4, pp. 225-240.
- [74] BRYERS, R. W. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1996, vol. 22, no. 1, pp. 29-120.
- [75] FÖRSTER, M. E .C. Pressurised pulverised coal combustion - A coal-based combined-cycle state of the cooperative project: Cleaned flue gas matches specifications for use with gas turbines. *International Journal of Energy Technology and Policy*. 2007, vol. 5, no. 3, pp. 383-390.
- [76] RODRIGUES, M., WALTER, A., FAAIJ, A. Performance evaluation of atmospheric biomass integrated gasifier combined cycle systems under different strategies for the use of low calorific gases. *Energy Conversion and Management*. 2007, vol. 48, no. 4, pp. 1289-1301.
- [77] ASADULLAH, M., ITOA, S. I., KUNIMORIA, K., YAMADA, M., TOMISHIGE K. Biomass Gasification to Hydrogen and Syngas at Low Temperature: Novel Catalytic System Using Fluidized-Bed Reactor. *Journal of Catalysis*. 2002, vol. 208, no. 2, pp. 255-259.
- [78] WORNAT, M. J., HURT, R. H., YANG, N. Y. C., HEADLEY, T. J. Structural and compositional transformations of biomass chars during combustion. *Combustion and Flame*. 1995, vol. 100, no. 1-2, pp. 131-143.
- [79] DAVIDSSON, K. O., KORSGREN, J. G., PETTERSSON, J. B. C., JÄGLID, U. The effects of fuel washing techniques on alkali release from biomass. *Fuel*. 2002, vol. 81, no. 2, pp. 137-143.
- [80] LIVINGSTON, W. R. Biomass ash characteristics and behaviour in combustion, gasification and pyrolysis systems. *Technology and Engineering*. 2007, vol. 1, p. 69.

- [81] LONG, J., SONG, H., JUN, X., SHENG, S., LUN-SHI, S., KAI, X., YAO, Y. Release characteristics of alkali and alkaline earth metallic species during biomass pyrolysis and steam gasification process. *Bioresource Technology*. 2012, vol. 116, pp. 278-284.
- [82] VOHLÍDAL, J. *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada, 1999. ISBN 80-716-9855-5.
- [83] JURŠÍK, F. *Anorganická chemie nekovů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2001. ISBN 80-7080-417-3.
- [84] CORBRIDGE, D. Phosphorus 2000 – chemismy. *Biochemistry and Technology*. 2000. ISBN 0-444-82550-9.
- [85] WANG, L., SKJEVRAK, G., HUSTAD, J. E., GRØNLI, M.G. Sintering characteristics of sewage sludge ashes at elevated temperatures. *Fuel Processing Technology*. 2012, vol. 96, pp. 88-97.
- [86] ZHANG, Q., LIU, H., QIAN, Y., XU, M., LI, W., XU, J. The influence of phosphorus on ash fusion temperature of sludge and coal. *Fuel Processing Technology*. 2013, vol. 110, pp. 218-226.
- [87] LINDSTRÖM, E., SANDSTRÖM, M., BOSTRÖM, D., ÖHMAN, M. Slagging characteristics during combustion of cereal grains rich in phosphorus. *Energy and Fuels*. 2007, vol. 21, no. 2, pp. 710-717.
- [88] VASSILEV, S. V., KITANO K., TAKEDA, S., TSURUE, T. Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility. *Fuel Processing Technology*. 1995, vol. 45, pp. 27-51.
- [89] ČSN ISO 540. *Uhlí a koks - Stanovení tavitelnosti popela*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [90] EVERARD, C. D., MCDONNELL, K. P., FAGAN, C. C. Prediction of biomass gross calorific values using visible and near infrared spectroscopy. *Biomass and Bioenergy*. 2012, vol. 45, pp. 203-211.
- [91] KRERKKAIWAN, S., FUSHIMI, CH., YAMAMOTO, H., TSUTSUMI, A., KUCHONTHARA, P. Influences of heating rate during coal char preparation and AAEMs on volatile-char interaction with different sources of biomass volatile. *Fuel Processing Technology*. 2014, vol. 119, pp. 10-18.
- [92] FANG, X., JIA, L. Experimental study on ash fusion characteristics of biomass. *Bioresource Technology*. 2012, vol. 104, pp. 769-774. ISSN 769-774.

- [93] CHUNGEN, Y., LASSE, A., ROSENDAHL, S. K. K. Grate-firing of biomass for heat and power production, *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008, vol. 34, no. 6, pp. 725-754. ISSN 0360-1285.
- [94] OBERNBERGER, I., BRUNNER, T., BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. *Biomass and Bioenergy*. 2006, vol. 30, no. 11, pp. 973-982. ISSN 0961-9534.
- [95] TEIXEIRA, P., LOPES, H., GULYURTLU, I., LAPA, N., ABELHA, P. Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a fluidized bed. *Biomass and bioenergy*. 2012, vol. 39, pp. 192-203.
- [96] VAMVUKA, D., KAKARAS, E. Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. *Fuel Processing Technology*. 2011, vol. 92, no. 3, pp. 570-581.
- [97] WERKELIN, J., SKRIFVAR, B. J., ZEVENHOVEN, M., HOLMBOM, B., HUPA, M. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*. 2010, vol. 89, no. 2, pp. 481-493. ISSN 0016-2361.
- [98] NORSTRÖM, S. H., BYLUND, D., VESTIN, J. L. K., LUNDSTRÖM, U. S. Initial effects of wood ash application to soil and soil solution chemistry in a small, boreal catchment. *Geoderma*. 2012, vol. 187-188, pp. 85-93.
- [99] KOTLÍK, RŮŽIČKOVÁ. *Chemie I. v kostce: [obecná a anorganická chemie, výpočty v oboru chemie] : pro střední školy*. 4. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 2005, 119 s. ISBN 80-253-0031-5.
- [100] JURŠÍK, F. *Anorganická chemie kovů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2002. ISBN 80-708-0504-8.
- [101] ŠRÁMEK, V., KOSINA, L. *Obecná a anorganická chemie*. 1. vyd. Olomouc: Fin, 1996. ISBN 80-718-2003-2.
- [102] Informace o využívání biomasy. *Skupina ČEZ* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/informace-o-vyuzivani-biomasy.html>
- [103] VAMVUKA, D., BANDELIS, G. Evaluation of wood residues from Crete as alternative fuels. *International Journal of Energy and Environment*. 2010, vol. 1, no. 4, pp. 667-670. ISSN 2076-2909.

- [104] JENKINS, B. M., BAXTER, L. L., MILES, T. R., MILES, T. R. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. 1998, vol. 54, no. 1–3, pp. 17-46. ISSN 0378-3820.
- [105] BRIDGEMAN, T. G., JONES, J. M., WILLIAMS, A. Overview of solid fuels, characteristics and origin. In Handbook of Combustion. *Solid Fuels*. 2010, vol. 14. pp. 1-30.
- [106] The Carbon cycle. *Living in the greenhouse!* [online]. 2013 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <https://eo.ucar.edu/kids/green/cycles6.htm>
- [107] Seminář Biomasa pro výrobu tepla. *Tzb-info* [online]. 2009 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/5537-seminar-biomasa-pro-vyrobu-tepla>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Koloběh uhlíku, zdroj: [106].....	4
Obrázek 2: Energetické využití biomasy, zdroj: [107]	6
Obrázek 3: Připravené pojivo	31
Obrázek 4: Forma na jehlánky	31
Obrázek 5: Pec CAF Carbolite	32
Obrázek 6: Zavážení tělísek do pece, foto: Ing. Hana Škrobánková, Ph.D.....	32
Obrázek 7: Tavení popela z mulčovací kůry	33
Obrázek 8: Počáteční stav, teplota 860 °C	36
Obrázek 9: Počátek deformace, teplota 989 °C	37
Obrázek 10: Počátek měknutí, teplota 1259 °C	37
Obrázek 11: Průběh měknutí, teplota 1264 °C.....	38
Obrázek 12: Tání, teplota 1273 °C.....	38
Obrázek 13: Počátek, teplota 900 °C	41
Obrázek 14: Počátek měknutí, teplota 1300 °C	42
Obrázek 15: Tání až tečení, teplota 1510 °C	42
Obrázek 16: Tání, teplota 1332 °C	45
Obrázek 17: Tečení, teplota 1398 °C.....	45

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Možnosti technického využití biomasy, zdroj: [63]	14
Tabulka 2: Výhřevnost různých druhů biomasy, zdroj: [63]	20
Tabulka 3: Rozdíly při přípravě vzorku, zdroj: [70]	27
Tabulka 4: Teploty tavení popela z travin, zdroj: [67]	28
Tabulka 5: Doba loužení travin (minuty) a změna teplot tání °C, zdroj: [67]	29
Tabulka 6: Teplota tání popela z kompostů, zdroj: [67]	30
Tabulka 7: Teploty tavení popela z mulčovací kůry	33
Tabulka 8: Charakteristika mulčovací kůry	33
Tabulka 9: Základní vlastnosti alkalických kovů	34
Tabulka 10: Teploty tavení mulčovací kůry s KCl	39
Tabulka 11: Základní vlastnosti kovů alkalických zemin	40
Tabulka 12: Teploty tavení mulčovací kůry s CaO	42
Tabulka 13: Teploty tavení mulčovací kůry s K_2HPO_4	46

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Výsledky tavení mulčovací kůry s KCl.....	39
Graf 2: Výsledky tavení mulčovací kůry s CaO	43
Graf 3: Výsledky tavení mulčovací kůry s K ₂ HPO ₄	46
Graf 4: Celkové vyhodnocení tání mulčovací kůry	49